



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut

Tootearenduse õppetool

MES70LT

Taavi Pärtin

**FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTO FEST15 MONOKOKK-
KERE KINNITUSANKRUTE PROJEKTEERIMINE**

Autor taotleb tehnikateaduse
magistri akadeemilist kraadi

Tallinn 2015

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Henrik Herraneni juhendamisel

“25” mai 2015 a.

Töö autor : Taavi Pärtin

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“25” mai 2015 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201... a.

..... allkiri

TTÜ masinaehituse instituut

Tootearenduse õppetool

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2015. aasta 2. semester

Üliõpilane: Taavi Pärtin 132354

Õppekava MATM02/11

Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja: Henrik Herranen

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Formula Student klassi vormelauto FEST15 monokokk-kere kinnitusankrute projekteerimine.

(inglise keeles) Monocoque inserts for Formula Student class racecar FEST15

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Täitmise tähtaeg |
|-----------|---|-------------------------|
| 1. | Kinnitusankrute teooriaga tutvumine | 01.11.14 |
| 2. | Kinnitusankrute LEM-arvutuste tegemine | 01.12.14 |
| 3. | Rakise projekteerimine ja valmistamine | 01.01.15 |
| 4. | Katsekehade valmistamine ning katsetamine | 01.03.15 |
| 5. | Väsimuskatse teostamine | 01.04.15 |

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: FEST15 monokokk-kerele kinnitusankrute projekteerimine

Täiendavad märkused ja nõuded:.....

Töö keel: ...Eesti keel.....

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt

Töö esitamise tähtaeg.....

Üliõpilane Taavi Pärtin..... /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja: Henrik Herranen /allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöörde

Sisukord

| | |
|--|-----------|
| Eessõna | 6 |
| 1. SISSEJUHATUS | 7 |
| 1.2. Ülesande püstitus | 9 |
| 1.2. Projekteerimist piiravad reeglid | 10 |
| 1.3. Üldine tutvustus komposiitmaterjalidest | 11 |
| 1.3.1 Laminaadi korrosioon | 12 |
| 1.3.2 Laminaadi väsimustugevus | 13 |
| 1.4. Konkurentide uuring..... | 14 |
| 2. MATERJALID JA METOODIKA | 17 |
| 2.1. Materjali valik | 17 |
| 2.2. LEM-metoodika | 19 |
| 2.3. Tõmbeteimi metoodika | 21 |
| 2.3.1. Rakise projekteerimine..... | 22 |
| 2.4. Väsimusteimi metoodika | 26 |
| 3. KINNITUSANKRUTE PROJEKTEERIMINE JA KATSETAMINE | 29 |
| 3.1 Esimene lahendus..... | 29 |
| 3.1.1. LEM | 29 |
| 3.1.2. Katsetamine ning valmistamine | 30 |
| 3.1.3. Järeldused..... | 35 |
| 3.2 Teine lahendus | 36 |
| 3.2.1. Võimalikud lahendused | 36 |
| 3.2.2. LEM | 38 |
| 3.2.2. Katsetamine..... | 42 |
| 3.2.3. Järeldused..... | 45 |
| 3.3 Kolmas lahendus..... | 45 |
| 3.3.1. LEM | 45 |
| 3.3.2. Katsetamine ning valmistamine | 50 |
| 3.3.3. Järeldused..... | 52 |
| 3.3.4. Katsekehade purunemise uurimine | 53 |
| 3.4 Neljas lahendus | 55 |
| 3.4.1. LEM | 55 |
| 3.4.2. Katsetamine ning valmistamine | 57 |
| 3.4.3. Väsimuskatsetus | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.4. Järeldused..... | 62 |
| 3.5 Erineva geomeetriaga kinnitusankrud monokokis..... | 63 |
| 3.5.1 Pedaalikoostu kinnitusankur | 64 |
| 4. SES-i JAOKS VAJALIKE KATSETUSTE TEOSTAMINE..... | 68 |
| 5. KINNITUSANKRUTE NING TUGEVDUSLAPPIDE KOGUSED MONOKOKK-KERES..... | 72 |
| KOKKUVÕTE..... | 74 |
| SUMMARY | 77 |
| KASUTATUD KIRJANDUS..... | 80 |
| LISAD | 83 |
| Lisa 1. 1-avaga kinnitusankur..... | 84 |
| Lisa 2. Nookuri kinnitusankur..... | 85 |
| Lisa 3. M6x30 kinnitusankru joonis..... | 86 |
| Lisa 4. 2-avaga sümmeetrilise kinnitusankru joonis..... | 87 |
| Lisa 5. Tõmbekõrva joonis..... | 88 |
| Lisa 6. Väsimuskatse kõrva joonis..... | 89 |
| Lisa 7. Rakise sisemise koostu ristitala joonis..... | 90 |
| Lisa 8. Laminaadi joonis..... | 91 |
| Lisa 9. Rakise sisemise koostu pikitala joonis..... | 92 |
| Lisa 10. Piduripedaali kinnitusankur..... | 93 |
| Lisa 11. Gaasipedaali kinnitusankru joonis..... | 94 |
| Lisa 12. Rakise välimise plaadi joonis..... | 95 |
| Lisa 13. Rakise sisemise koostu tugiplaat..... | 96 |
| Lisa 14. Rakise välimine plaat avadega..... | 97 |
| Lisa 15. Rakise koostejoonis..... | 98 |

Eessõna

Töö teema arenes välja Tallinna Tehnikaülikooli ning Tallinna Tehnikakõrgkooli ühismeeskonna Formula Student Team Tallinna meeskonna vajadusest projekteerida uuele võistlusautole FEST15 süsinikkomposiitmaterjalidest valmistatud kandevkerele (ing.k monocoque) kinnitusankrud erinevate detailide kinnitamiseks. Antud lõputöö projekti järgi valmistatud kinnitusankrutega FEST15 osaleb sel hooajal võistlustel nii Ungaris, Hispaanias kui ka Tšehhis. Sooviksin tänada kogu Formula Student Team Tallinna meeskonna kollektiivi ning lõputöö juhendajat, Henrik Herraneni, asjalike soovitude ja heade nõuannete eest.

1. SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teemaks on Formula Student Team Tallinna poolt projekteeritava ning ehitatava vormelauto FEST15 monokokk-kere kinnitusankrute projekteerimine. Teema valiti, kuna antud valdkond on meeskonnas uudne, mille tõttu on tegemist väga huvitava tootearendusprojektiga.

Formula Studenti näol on tegemist tehnikateaduste tudengitele suunatud tootearendusvõistlusega, mis sai alguse Ameerika Ühendriikidest. Tudengi vormeli sarjas on võisteldud juba üle 30 aasta ning viimase aastakümnega on Formula Studenti populaarsus aina kasvanud, jõudes nii Euroopasse, Jaapanisse kui ka Austraaliasse [1].

Tootearendusvõistlus Formula Student kujutab endast üheistmelise vormelauto projekteerimist, ehitamist, auto tutvustamist kohtunikele, sellega erinevate katsete läbimist ning võidusõitmist ringrajal. Sarjas kehtivad Formula SAE reeglid, mida 2015. a hooajaks on väga põhjalikult uuendatud. Reeglitega on kehtestatud kinnitusankrutele mõningad piirangud, millest täpsemalt on juttu peatüki 1.2, "Projekteerimist piiravate reeglite", all. [1]

Eestis hakkas Formula Studenti idee levima 2005. aasta alguses ning Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühismeeskonna loomiseni jõuti poolteist aastat hiljem. Esimene reaalne auto ehitati 2008. aastal ning sellega osaleti ka põhivõistlusel. 2012. aasta sügisest lõpetati bensiinmootoriga vormeli arendus ning alustati elektrivormeli projekteerimise ja ehitusega. Hetkel hoiab meeskond maailma edetabelis neljandat kohta rohkem kui 600 meeskonna seas. Konkurendid, kes meeskonda edetabelis edestavad, on kõik nelikveolised ning süsinikkomposiidist monokokk-raamiga. FEST15 otsustati seega ehitada samuti nelikveo ning süsinikkomposiidist monokokraamiga, et jätkata teekonda maailma parima tiitlile. Monokoki näol on tegemist komposiitmaterjalidest valmistatud kandevkerega [1].

Monokokk-kere ehitamine on meeskonnale esmakordne kogemus. Süsinikkomposiidist detaile on valmistatud aastaid, kuid kandvate konstruktsioonidega kogemus puudub. Seni on komposiitmaterjalidest valmistatud tiibu, katmikku ning vormelauto põhja. 2 hooaega tagasi, mil alustati elektrivormeli ehitusega, sai vastu võetud otsus ehitada ka akukaste ümbritsevad küljekarbid süsinikkomposiitmaterjalidest. Tegemist oli teadliku otsusega, kuna oli selge, et varem või hiljem peab Formula Student Team Tallinn üle minema monokokk-kerele. Küljekarpide projekteerimine ning ehitamine annab kogemuse, mille pealt on võimalik hinnata probleeme, mis süsinikkomposiitmaterjalidest kandevstruktuuridega tekkida võivad.

Hetkel võib öelda, et antud konstruktsioonelementidel elueaga probleeme pole olnud ning akukastid on korrektselt auto küljes püsinud. Suuremad probleemid esinesid just valmistamisfaasis, mis andis meeskonnale väga väärtuslikku infot, millest õppida.

Eesti tingimustes on süsinikkomposiitmaterjalist toodete valmistamisel probleemiks ka tööstuse puudus, mis suuresti piirab ära mõningate valmistamisviiside kasutamise. Näiteks autoklaavi puudumine välistab kohe eelimpregneeritud kanga kasutamise ning ainsaks reaalseks monokoki valmistusviisiks on seega infusioonimine. Tööstuse ning suurt koormust kandvate konstruktsioonide projekteerimiskogemuse puudumise tõttu tuli tootearendust alustada nullist ning esmalt tavapärase infootsinguga. Seejärel tuli läbi viia erinevaid tugevusanalüüse ning nende tulemusi reaalseste katsetega kinnitada, kuna komposiitmaterjalide tugevusarvutus on kordi keerukam ning ebatäpsem kui traditsiooniliste isotroopsete materjalide korral.

Süsinikkomposiitmaterjalidest monokoki eelisteks tavalise toruraami ees on raami suurem jäikus ning madalam mass. Formula Student Team Tallinn on võtnud oma esimese monokoki korral eesmärgiks saavutada võrreldes toruraamiga 3 kordse raami väändejäikuse tõusu võrreldes toruraamiga (toruraami väändejäikus 2300 Nm/kraadi kohta) ning monokoki kaal ei tohi ületada toruraami massi ehk konstruktsioon peab tulema kergem kui 30 kg. Hinnates konkurentide lahendusi, siis 1,5 kordne kaaluvõit võrreldes toruraamiga oleks võimalik, kuna FSAE sarjas võistlevatel tipptiimidel kaaluvad monokokk-kered umbes 20kg.

Rääkides teema aktuaalsusest, siis Eestis teadaolevalt varem süsinikkomposiitmaterjalidest valmistatud üheosalisi monokokk-keresid ehitatud pole. Vaadates pilti laiemalt, siis lisaks F1-s kasutusel olevatele monokokk-keredele liigub ka autotööstus komposiitmaterjalidest valmistatud kerede poole ning seda eelkõige superautode puhul, kus juhitavuse ja kiirusomaduste tõttu on olulised nii kere suur jäikus kui ka sõiduki madal mass.

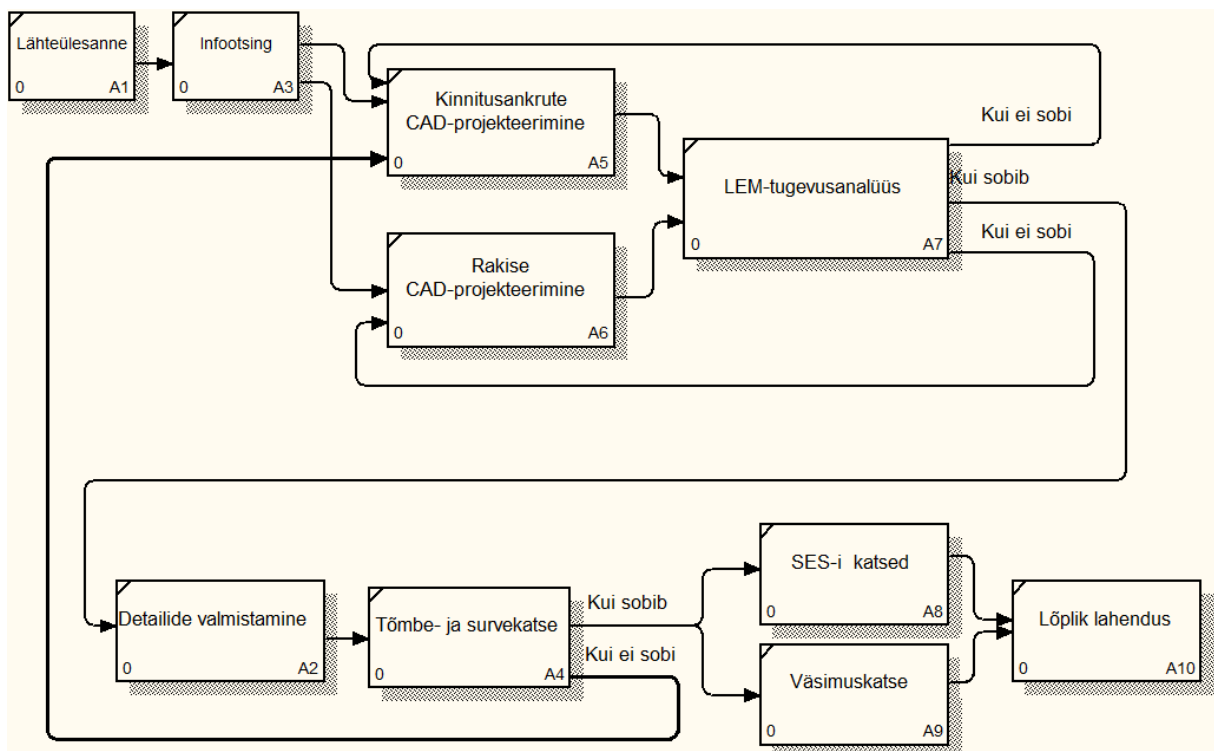
Lõputöös tuleb täpsemalt juttu süsinikkomposiitmaterjalide teooriast, mida tuleb järgida kinnitusankrute projekteerimisel. Lisaks on kirjeldatud laminaatide LEM-arvutusi (lõplike elementide meetod) ning reaalseid katsetusi, milleks tuli projekteerida eraldi rakis. Lisaks viidi läbi ka laminaadi väsimuskatse kinnitamaks, et projekteeritud lahendus peab vastu reaalses oludes ning oleks sobilik kasutada FEST15 vormelautol.

Projekteerimisel kasutatakse tarkvaraprogramme Catia V5R21, Solidworks 2013 ning Ansys 14.5 koos ACP (ACP- komposiidanalüüs) laiendusega.

1.2. Ülesande püstitus

Lõputöö eesmärgiks on projekteerida ning valmistada süsinikkomposiitmaterjalist valmistatud monokokk-kere kinnitusankrud, mille ülesanne on kere küljes kinni hoida erinevaid detaile nagu näiteks vedrustust, roolisüsteemi, turvakaart jne. Eelnevatel aastatel kasutusel olnud ruumilise toruraami korral pole kinnitusankruid vaja läinud, kuna kõik vajaminevad koostud kinnitati laserlõikuses väljalõigatud kõrvade abil toruraami külge. Töötavate ja kvaliteetsete kinnitusankrute valmistamiseks ning projekteerimiseks tuleb teostada hulgaliselt erinevaid ülesandeid:

1. Projekteerimist piiravate reeglite kindlaks tegemine
2. Infootsing erinevate kinnitusankrute kohta ning esmane selekteerimine
3. Kinnitusankrute CAD-projekteerimine
4. Tugevusarvutuste teostamine Ansys ACP keskkonnas
5. Katserakise projekteerimine ning valmistamine
6. Reaalsete katsekehade lamineerimine
7. Katsekehade katsetamine ning järelduste tegemine
8. Väsimuskatsete teostamine



Sele 1.1. Arendustöö plokkiagramm

1.2. Projekteerimist piiravad reeglid

Tudengi vormeli sarjas on kehtestatud suur hulk reegleid, mille põhieesmärk on tagada sõitjate turvalisus. Formula Studenti sarjas kehtivad FSAE reeglid, mis sellel aastal on võrreldes 2013/2014 hooajal kehtinud reeglitega põhjalikult uuenenud. Eelkõige on suurendatud võistlejate turvalisust ning piiratud aerodünaamika reegleid, mille tõttu on eesootamas põnev tootearendushooaeg. Muudetud aerodünaamika reeglid kinnitusankrute projekteerimist ei mõjuta, küll aga mõjutavad seda akukasti ning monokokk-kere muudetud reeglid. Järgnevalt on välja toodud reeglid, mida tuleb silmas pidada kinnitusankrulahendusi ning -kinnitusi projekteerides. Väljavõte on tehtud FSAE 2015/2016 reeglitest [4].

T3.21 Kokkupõrkeleevendi

- T3.21.3 Juhul kui kokkupõrkeleevendi ei ole raamiga üks osa, tuleb see esimese tugiseina külge kinnitada vähemalt nelja M8 poldiga, mille tugevusklass on vähemalt 8.8.
- T3.40.1 Kinnituspunkt monokoki ja muu põhistruktuuri vahel peab olema suuteline kandma 30 kN suurust koormust igas suunas.

T3.40 Monokokk-kere põhistruktuuri kinnitused

- T3.40.2 Laminaat, kinnituskõrvad, tugevdusseibid ja kinnitusankrud peavad omama piisavalt nihkepinda, keevituspinda ning tugevust, et kanda 30 kN suurust koormust igas suunas. Andmed võetakse laminaadi nihkekatsesest.
- T3.40.3 Iga kinnituspunkt nõuab vähemalt kahte M8 polti tugevusklassiga 8.8 või enam.
- T3.40.4 Iga kinnituspunkt nõuab terasest tugevdusplaate, mille miinimum paksus on 2 mm. Vajadusel võib kasutada alternatiivseid materjale, kuid nende tugevust tuleb tõestada.
- T3.40.5 Esimese turvakaare tugede ja tagumise turvakaare tugede kinnitamiseks on lubatud kasutada ühte M10 polti tugevusklassiga vähemalt 8.8. Ühte polti on lubatud

kasutada turvakaarte tugede kinnitamiseks reegli T3.40.3 alternatiivina juhul kui polt asub toru tsentrijoonel.

T3.41 Turvavööde kinnituspunktid monokokk-kere küljes

- T3.41.1 Õlarihmade kinnituspunkt monokokk-kere küljes peab suutma kanda 13 kN suurust koormust enne purunemist.
- T3.41.2 Sukeldumisvastaste rihmade kinnituspunkt monokokk-kere küljes peab kannatama 6,5 kN suurust koormust enne purunemist.
- T3.41.3 Juhul, kui õla- ning sukeldumisvastased rihmad on kinnitatud ühte ja samasse kinnituspunkti, peab kinnituspunkt vastu pidama 19,5 kN suurusele koormusele enne purunemist.
- T3.41.4 Turvavööde tugevuse tõestamiseks tuleb teostada ka tõmbekatse, kus kasutatakse samasugust laminaati nagu monokokk-keres ning turvavööd tõmmatakse sama nurga all nagu monokokk-keres.

T5.2 Rihmade ja turvavööde paigaldamine monokokk-kere külge

- T5.2.2 Kinnituskõrv, kuhu turvavöö on kinnitatud, peab olema raami külge kinnitatud vähemalt kahe M6 8.8 või suurema tugevusklassiga poldiga.

EV3.4 Akukast - Mehaaniline konfiguratsioon

- EV3.4.9 Akukasti kinnituspunkt monokokis peab vastu pidama 20 kN suurusele koormuse igas sihis.

1.3. Üldine tutvustus komposiitmaterjalidest

Komposiitmaterjalideks nimetatakse kahest või enamast osast koosnevaid materjale, kus faaside omadused ning orientatsioon erinevad teineteisest märgatavalt. Armatuur annab komposiitmaterjalidele tugevuse, jäikuse ning tagab mehaaniliste omaduste säilimise tööolukorras. Maatriks annab materjalile vormi, monoliitsuse ning tagab koormuse ümberjaotumise armatuuri elementide vahel [20]. Maatriksi tugevus määrab suures osas ära

laminaadi surve- ning nihketugevuse. Armatuur määrab ära laminaadi tõmbetugevuse ning osaliselt ka nihketugevuse. [21]

Komposiitmaterjali tugevus sõltub armatuuri sisaldusest V_A ning kõige suurem tugevus on komposiitmaterjalil umbes 60 % armatuuri sisalduse korral [20]. Materjalikatsetuste käigus selgus, et komposiitmaterjalide tugevus oleneb ka vaakumi suurusest, milles detailid valmistatud on. Tehes materjalikatsetusi, infusiooniti detailid alati 0,9 bar suuruse vaakumiga. Tvilli katsekehade puhul oli sel juhul hilisemaks tõmbetugevuseks 760 MPa. Prooviti ka materjali tugevust, kui detaili infusiooniti 0,6 bar-i suuruse vaakumiga. Sel juhul on materjalikiud nõrgemini kokku surutud ning laminaati mahub rohkem vaiku. Hilisem tõmbekatse näitas, et madalama vaakumiga valmistatud tvilli katsekeha tõmbetugevus oli ainult 400 MPa, mis on ligi 2 korda väiksem 0,9 bar suuruse vaakumiga infusioonitud katsekehast.

Komposiitmaterjali survetugevust mõjutavad nii armatuuri mehaanilised omadused kui ka kiu läbimõõt, maatriksi jäikus, tugevus ning faasidevaheliste üleminekupindade omadused. Komposiitmaterjal kannab survekoormust nii kaua, kuni ta kiud ei nõtku [20].

Komposiitmaterjalidel on piki kiudu väga suur tugevus ning jäikus. Painutades laminaati ristisuunas, on jäikus oluliselt väiksem. Antud põhjusel paigutatakse laminaati materjalikihte erineva nurgaga, et saavutada nõutud tugevusomadusi erinevate jõu mõjumissuundade korral [21].

Laminaat on kõige tugevam kui laminaadile mõjuvad jõud on rakendatud laminaadi kiududega paralleelselt ning maatriks töötab nihkele. Kõige nõrgem on laminaat siis kui materjalikihte tõmmatakse teineteisest eemale ning maatriks töötab tõmbele [21].

1.3.1 Laminaadi korrosioon

Süsinikkomposiitmaterjalist monokokk-kere projekteerimisel tuleb tähelepanu pöörata ka laminaadi korrosioonile. Süsinikkomposiitmaterjalist laminaadis tekib galvaaniline korrosioon, kuna süsinik juhib hästi elektrit. Galvaanilise korrosiooni oht suureneb veelgi kui suure pindalaga süsiniklaminaat on kontaktis mõne väikese metallist osaga nagu näiteks polt, mutter või kinnitusankur ning seda eelkõige suure katoodi-anoodi pindalade suhte tõttu [22].

Alumiiniumi ning süsiniku omavaheline kontakt on galvaanilise korrosiooni seisukohalt halvim juht. Alumiiniumi pind hakkab oksüdeeruma ning pinnale moodustub valge pulbri kiht. Pulbri kiht katab alumiiniumi pinda osaliselt ning katmata detaili osa oksüdeerumine kiireneb, kuna katoodi-anoodi suhte pindala suureneb veelgi. Juhul kui alumiinium ja süsinik puutuvad omavahel kokku soolase vee keskkonnas, tekivad kahjustused ka süsinikkomposiidist laminaadile, kuhu tekivad vesinikpraod. Alumiiniumist kinnitusankru oksüdeerumisel katkeb ka laminaadi ning kinnitusankru omavaheline kontakt (kinnitusankru pinnale tekkiva pulbri tõttu), mille tõttu laminaat on suuteline vastu võtma oluliselt väiksemaid koormusi kui korraliku kinnitusankru ja laminaadi vahelise liite korral. Galvaanilise korrosiooni vähendamiseks on mitmeid meetmeid [22]:

- Esmane variant on kasutada titaanisulameid, mis on kõrge korrosioonikindlusega.
- Teiseks võimalikuks lahenduseks on süsiniku ning kinnitusankru vahele paigaldada elektrit mittejuhtiv materjal nagu näiteks klaasriie.
- Kasutada estri baasil epovaike, mis vähendavad vee ligipääsu laminaadi sisemusse.
- Kasutada täiteaineid katmaks süsinikkomposiidi ja kinnitusankru vahelist pinda, muutes selle nii elektrit mittejuhtivaks.
- Anodeerida alumiiniumist valmistatud kinnitusankur

Kõige lihtsamaks lahenduseks, mis lisab laminaadile tugevust ning on lisaks ka kerge, on klaasriide kasutamine kinnitusankru ning süsiniku vahel ning antud lahendus leiab kasutust ka FEST15 monokokis.

1.3.2. Laminaadi väsimustugevus

Laminaadi väsimuse koha pealt mängivad suurt rolli materjalikihtide omavaheline asetus ning kiudude omavahelised nurgad. Silvain A. Michela, Rolf Kieselbacha, Hans Jörg Martensi poolt läbi viidud teadusuuringus uuriti laminaadi väsimustugevust erinevate kiu nurkade korral. Kasutati kolme erinevat laminaati [23]:

- Kõik kiud 0° nurga all
- Kiud 45° ja 0° nurga all
- Kiud 45° , 90° ja 0° nurga all

Katsetustest selgus, et kõige parema väsimustugevusega on laminaat, kus kiud asuvad nii 45° , 90° kui ka 0° nurga all [23].

Komposiitmaterjalidel esineb põhiliselt 4 erinevat tüüpi väsimuspurunemisi [24]:

- Maatriksi purunemine
- Delamineerumine ehk materjalikihtide teineteisest eraldumine
- Armatuuri purunemine
- Kiu ja maatriksi vahelise sideme purunemine

Väsimustugevuse poole pealt alates kõige tugevamast lõpetades kõige nõrgema materjaliga jagunevad komposiitmaterjalid järgmiselt [24]:

- Kõrge elastsusmooduliga süsinikfiiber
- Kõrge tugevuse ja madala elastsusmooduliga süsinikfiiber
- Aramiidi ning süsiniku hübriid
- Aramiid
- Klaasriide ning aramiidi hübriid
- Kõrge elastsusmooduliga klaasriie
- Klaasriie

1.4. Konkurentide uuring

Projekteerimise algfaasis sai teostatud põhjalik konkurentide uuring selgitamaks võimalikke kinnitusankru lahendusi. Seoses suure salastatusega ei õnnestunud erinevate meeskondade kodulehtedelt leida mingisugust infot. Seejärel sai vaadatud võistluste fotogaleriisid ning disainikaitsmiste piltidest võis leida nii mõndagi huvitavat. Järgnevalt on välja toodud 2 tippmeeskonna kinnitusankru lahendused:

Esimesena on välja toodud Stuttgarti meeskonna kinnitusankru lahendus.



Sele 1.2. Stuttgarti meeskonna ankrulahendus [2]

Stuttgarti meeskonna kinnitusankrud on valmistatud süsinikust ning nende kuju on seestpoolt optimeerimata, mis omakorda tõstab monokoki massi. Eriliselt hakkab silma ankrud optimeerimata kuju sele 1.2 all vasakus servas, kus on näha kahte väga suurt kinnitusankrut. Stuttgarti lahenduse miinuseks on lisaks eelnevalt mainitud kaaluprobleemile ka väike liimipindala kinnitusankru ja vahu vahel, mille tõttu on reaalne oht kinnitusankru väljatõmbamiseks või -surumiseks laminaadist. Sele 2.1 pealt on võimalik näha ka väga paksu kinnitusankruid, mis lubab eeldada, et kinnitusankur on laminaadis vahu paksune.

Järgnevalt on välja toodud Rootsi meeskonna Chalmersi kinnitusankru lahendused:



Sele 1.3. Chalmersi meeskonna kinnitusankrud [3]

Sele 1.3 pealt on näha, et kasutatakse kas alumiiniumist või titaanist kinnitusankruid, mille kuju on optimeeritud, saavutamaks võimalikult madalat massi ning suurt liimipinda. Kinnitusankrute paksuse järgi võib öelda, et tegemist on samuti terve laminaadi paksuses

olevate kinnitusankrutega, mis nõuavad oma tugevuse saavutamiseks väga heade mehaaniliste omadustega süsinikkangast. Sele 1.3 vasakus servas on näha eeldatavasti vedrustuse ankrut. Kinnitusankru väliskuju on enamasti ovaalne, mille tõttu tekib pingekonsentraator laminaadi vahu ning kinnitusankru väliskontuuri vahele, kus leiab aset ka purunemine.

Eelnevalt mainitud sele 1.2 ja sele 1.3 põhjal võis hinnata meeskondade kinnitusvahendite kuju. Laminaadi kohta ei leia nendelt piltidelt mingit infot, kuna see on nii Formula Student meeskondade kui ka tööstusettevõtete üks suurimaid saladusi, mille tõttu tuleb parim kangaste asetus ja vahtude paigutus tugevusanalüüsi ning katsete põhjal ise välja selgitada.

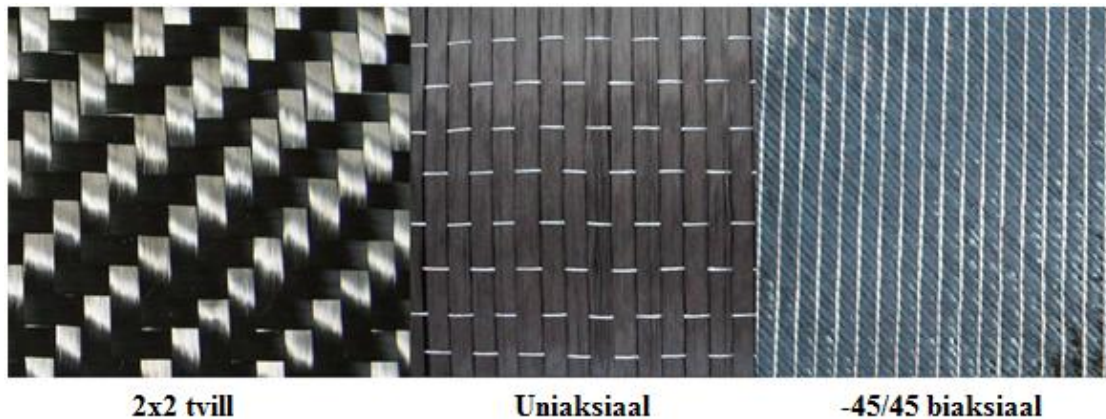
2. MATERJALID JA METOODIKA

2.1. Materjali valik

Monokoki valmistamiseks kasutatakse viite erinevat tüüpi kangast:

- 2x2 tvilli $0^{\circ}/90^{\circ}$, mille pindtihedus on 200 g/m^2 ;
- $-45^{\circ}/45^{\circ}$ biaktsiaal, mille pindtihedus on 400 g/m^2 ;
- 0° uniaktsiaalset kangast (ing. k UD-*unidirectional*), mille pindtihedus on 300 g/m^2 ;
- $0^{\circ}/90^{\circ}$ aramiidi, mille pindtihedus on 220 g/m^2 ;
- $0^{\circ}/90^{\circ}$ klaasriiet, mille pindtihedus on 200 g/m^2 .

Täidismaterjalidest kasutatakse 10 mm, 19 mm ning 25 mm paksust vahtu.



Sele 2.1. Tvill $0^{\circ}/90^{\circ}$, UD 0° ning biaktsiaal $-45^{\circ}/45^{\circ}$ kangas [26],[27],[28]

Tvilli näol on tegemist kangaga, mida on vormi paigutada kõige lihtsam, kuna kanga kiud on lahtised ning reeglina peenikesed. Tvill omab ka head nihketugevust võrreldes uniaktsiaali ja biaktsiaaliga. Uniaktsiaalsel kangal jooksevad kiud kõik ühes suunas, tagades maksimaalse võimaliku tugevuse kanga telje sihis. UD-kanga nihketugevus on madal, kuna puuduvad ristisuunas läbipõimitud kiud, mis laminaati koos hoiaks ning seetõttu on kiudude omavahelise eraldumise ehk delamineerumise oht suur. Biaktsiaali näol on tegemist kahe omavahel risti asetatud UD-kangaga, mis on omavahel kokku õmmeldud. Biaktsiaal on tugev kahes kangakiu jooksmise sihis, kuid kuna kiud pole omavahel läbi põimitud, on materjalikihtide eraldumise oht samuti suur [21]

Tugevusarvutused teostati programmis Ansys 14.5 ning tugevusarvutuste sisendandmete saamiseks tuli läbi viia materjalikatsetused kõikide kerel kasutatavate kangastega.

Materjalikatsetused teostas Formula Student meeskonna liige, Marek Lentsius. Järgnevalt on välja toodud andmed materjalide kohta, millega on võimalik alustada komposiidi tugevusarvutuste tegemist.

Tabel 2.1. Materjalikatsetuste tulemused

| | Tvill, 200g | Biaksiaal, 400g | UD,300g | Ühik |
|-------------------------------------|-------------|-----------------|----------|-------------------|
| Tihedus | 1398 | 1318 | 1341 | kg/m ³ |
| Ortotroopne elastsus | | | | |
| X-suunaline elastsusmoodul | 48,8 | 68,5 | 124,7 | GPa |
| Y-suunaline elastsusmoodul | 48,8 | 68,5 | 7,0 | GPa |
| Z-suunaline elastsusmoodul | 12,6 | 11,6 | 10,7 | GPa |
| Poissoni tegur XY | 0,004 | 0,320 | 0,340 | |
| Poissoni tegur YZ | 0,300 | 0,030 | 0,500 | |
| Poissoni tegur XZ | 0,290 | 0,030 | 0,340 | |
| Nihkemoodul XY | 8,0 | 2,9 | 4,0 | GPa |
| Nihkemoodul YZ | 2,7 | 2,5 | 3,0 | GPa |
| Nihkemoodul XZ | 2,7 | 2,5 | 4,0 | GPa |
| Ortotroopsed pingeliimiidid | | | | |
| X-telje sihiline tõmbetugevus | 766,0 | 758,0 | 1305,7 | MPa |
| Y-telje sihiline tõmbetugevus | 766,0 | 758,0 | 21,0 | MPa |
| Z-telje sihiline tõmbetugevus | 19,0 | 11,3 | 9,0 | MPa |
| X-telje sihiline survetugevus | -307,6 | -344,5 | -290,7 | MPa |
| Y-telje sihiline survetugevus | -307,6 | -344,5 | -72,0 | MPa |
| Z-telje sihiline survetugevus | -150,0 | -150,0 | -72,0 | MPa |
| Nihketugevus XY | 78,4 | 65,4 | 45,9 | MPa |
| NihketugevusYZ | 7,9 | 7,7 | 6,2 | MPa |
| NihketugevusXZ | 7,9 | 7,7 | 45,9 | MPa |
| Ortotroopsed deformatsioonilimiidid | | | | |
| X-telje sihiline tõmme | 1,3 | 1,1 | 1,1 | % |
| Y-telje sihiline tõmme | 1,3 | 1,1 | 0,3 | % |
| Z-telje sihiline tõmme | 0,1 | 0,4 | 0,3 | % |
| X-telje sihiline surve | -2,1 | -2,3 | -1,2 | % |
| Y-telje sihiline surve | -2,1 | -2,3 | -1,6 | % |
| Z-telje sihiline surve | -1,3 | -1,3 | -1,6 | % |
| Nihkedeformatsioon XY | 13,6 | 12,0 | 10,0 | % |
| Nihkedeformatsioon YZ | 1,2 | 0,7 | 4,3 | % |
| Nihkedeformatsioon XZ | 1,2 | 0,7 | 10,0 | % |
| Tsau-Wu konstandid | | | | |
| Ühendustegur XY | -1 | -1 | -1 | |
| Ühendustegur YZ | -1 | -1 | -1 | |
| Ühendustegur XZ | -1 | -1 | -1 | |
| Kanga tüüp | | | | |
| Tüüp | Põimitud | Tavaline | Tavaline | |
| Paksus | 0,20 | 0,29 | 0,38 | mm |

Kinnitusankrute valmistamisel kasutati kahte erinevat materjali: Al 6082 T6 lehtmaterjali ning tvilli kangast pindtihedusega 200 g/m². Katsekehade lamineerimisel kasutati West Systemsi epovaiku INF 114 ning keskmise kiirusega kõvendit INF 211 [7]. Kinnitusankrute projekteerimisel kasutati samu materjale, mida kasutatakse monokoki valmistamiseks, kuna monokoki kangaid lõigates jääb alles palju jääkmaterjale, mida saab ideaalselt ära kasutada tugevduslappide valmistamiseks ning kinnitusankru materjalikihtide paigutus tuleb valmistada lähtuvalt monokoki üldisest kihtide paigutusest. Kinnitusankru valmistamiseks kasutatav Al 6082 T6 otsustati valida kinnitusankru LEM-arvutuse põhjal. Süsinikust kinnitusankur

otsustati valmistata tvillist, kuna kangas kannatab paremini nihkekoormusi kui biaktsiaal ning lisaks on tvilli tõmbetugevus meeskonna poolt läbi viidud materjalikatsetuste põhjal samuti suurem.

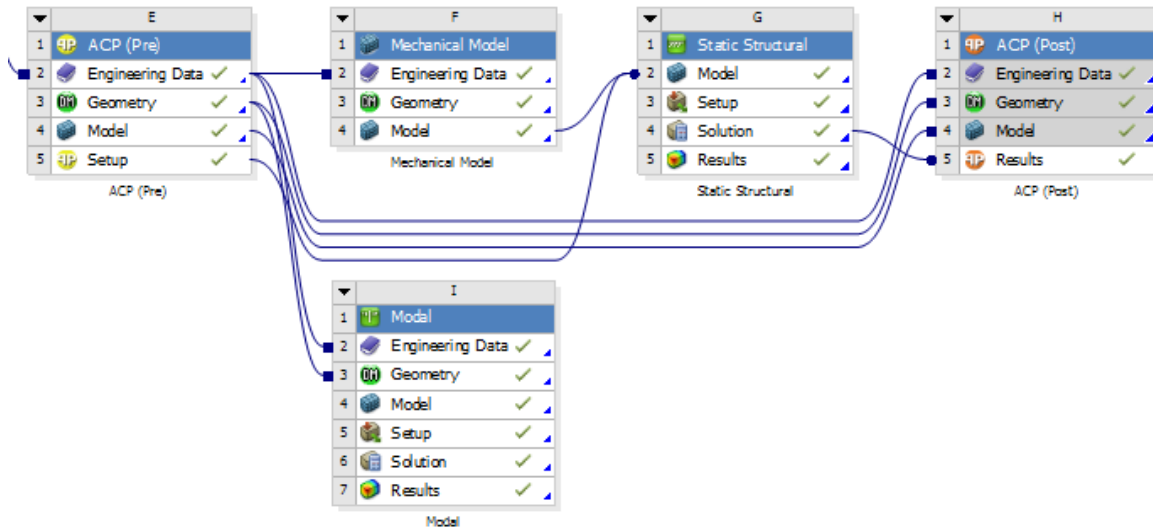
2.2. LEM-metoodika

Paralleelselt kinnitusankrute katsetamisega sai erinevaid kinnitusankru kujusid, materjalikihtide tüüpe ning kiudude omavahelisi nurki analüüsitud lõplike elementide meetodil ehk LEM-meetodil. Tugevusarvutused viidi läbi Ansys 14.5 *ACP* keskkonnas, mis on üks väheseid programme, millega on võimalik teostada komposiitmaterjalide tugevusarvutusi. Esialgset tugevusanalüüsid viidi läbi Ansys-i enda materjalidega, kuid suurte erinevuste tõttu võrreldes reaalsete katsetega viidi läbi materjalikatsetused ning koostati Ansys-i jaoks uued materjalid, millega LEM-arvutuste tulemuste täpsus paranes märgatavalt.

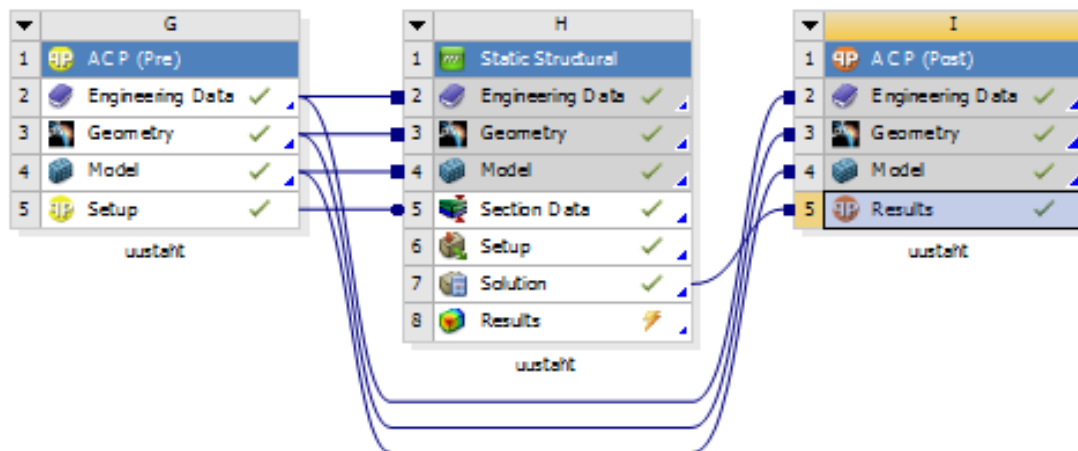
Komposiitmaterjalide tugevusarvutuste tegemine erineb mõnevõrra tavapäraste isotroopsete materjalide analüüsimisest. Täpsemad juhendid, kuidas analüüsida komposiitmaterjalide omadusi, saadi koolituselt, mis kandis pealkirja "ANSYS Composite PrepPost. Modeling Composites the Simple Way" [17].

Kinnitusankrute tugevusarvutuste tegemiseks kasutati kahte erinevat LEM-mudelit. Ühel juhul kasutati koorikelementidega analüüsi, mis on kiirem kui ruumiliste elementidega analüüs, kuid koorikelementide analüüsi korral ei ole Ansys-i *ACP*-programmis võimalik hinnata kinnitusankrule ning vahule mõjuvaid koormusi. Koorikelementidega tugevusarvutuste tegemine on õigustatud olukorras, mil kinnitusankru ning vahu geomeetria on valmis projekteeritud ning analüüsi käigus soovitakse parandada materjalikihtide omavahelist asendit ning kihtide arvu. Teisel juhul kasutati ruumiliste elementidega mudelit, mille miinuseks on eelkõige analüüsi kestvuse aeg. Võrreldes näiteks ruumiliste elementidega tugevusarvutuse aega koorikelementidega arvutusega, siis keskmiseks analüüsi pikkuseks 2 mm suurustee elementide võrgustiku korral oli ruumiliste elementidega mudeli korral umbes 3 tundi. 0,1mm suuruste elementide võrgustikuga koorikelementidega arvutuste korral 5 minutit. Analüüsimisel kasutati nelinurkseid elemente, mis laminaadis tekkivaid pingeid ning deformatsioone paremini hinnata [29].

Esialgset projekteerimist alustati ruumiliste elementidega mudeli kasutamisega, kuna soov oli näha kinnitusankrus ning vahus tekkivaid deformatsioone ning pingeid. Järgnevalt on välja toodud Ansys-i ruumiliste elementidega mudeli ning koorikmudeli ülesehitus:



Sele 2.2. ACP ruumiliste elementidega mudeli ülesehitus



Sele 2.3. ACP koorikelementidega mudeli ülesehitus

ACP Pre moodulis pannakse paika kangakihtide omavahelised asendid ning nurgad. *Mechanical model*-i all pannakse paika isotroopsete materjalide parameetrid ning nii *ACP Pre* kui ka *Mechanical Model*-i all genereeritakse elementide võrgustik. Modaalanalüüsi kasutati analüüsimudeli valideerimiseks, et oleks võimalik hinnata, kas erinevad koostu osad püsivad omavahel koos või mitte. Probleeme esines Catia V5R21 koostu analüüsimisega, kuna pinnad ning ruumilised kehad ei püsinud omavahel kontaktis. Probleem sai lahendatud failiformaadi

vahetusega ning edaspidi sai analüüse teostatud *Parasolid* formaadis, millega tõrkeid ei esinenud.

Ansysi komposiidi analüüsis on võimalik hinnata ka purunemiskriteeriume ning seda ka laminaadi kiht kihi haaval. On võimalik hinnata, kas materjal puruneb liigse deformatsiooni või liigse pinge tõttu. Lisaks on võimalik hinnata, mis sihis materjal puruneb, kas kiu suundades, risti kiudu või nihkele [17]. Projekteerimist ning katsetamist alustati ühe poldiavaga kinnitusankru baasil teada saamaks tavapärase kinnituspunkti tugevust ning probleeme, mis võivad kinnitusankrute projekteerimisel tekkida. Lisaks ei olnud antud hetkeks valminud veel kinnitusrakis ning kinnituskõrv kahe poldiavaga ankru katsetamiseks. Reeglitega on paika pandud, et kõikides põhistruktuuri kinnituspunktides tuleb kasutada kahe poldiavaga kinnitust ning kuna ka vedrustuses on kasutusel analoogne lahendus, analüüsiti ja katsetati alates teisest lahendusest kahe poldiavaga kinnitusankrut. Töö lõpuosas, peatüki 4, "SES-i jaoks vajalike katsetuste tegemine", all on välja toodud katsetused ka lõplike ühe poldiavaga lahenduste kohta.

2.3. Tõmbeteimi meetodika

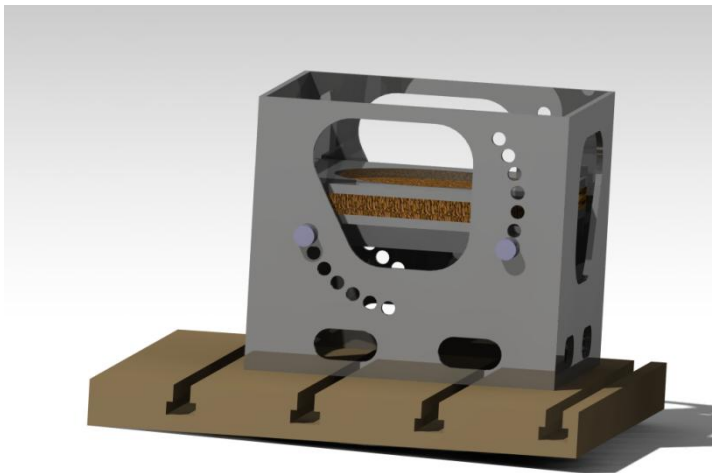
Tõmbeteimi katsetused viidi läbi TTÜ katselaboris Instron 8802 masinal. Esimest katsekeha suruti läbi 130 mm diameetriga ava, et teada saada, kui tugev on kinnitusankur eelmise aasta küljekarbi materjalikihtide puhul. Antud juhul kasutati 1-poldiavaga kinnitusankrut. Teiste katsekehade jaoks valmistati 250 mm avaga plaat, mis asetati laminaadi peale ning fikseeriti töölaua külge. Seejärel tõmmati kinnitusankrut normaali sihis läbi ava. Seoses plaadi liigse deformeerumisega otsustati valmistada rakis, mis oleks suuteline taluma nii surve- kui ka tõmbekoormusi. Rakise projekteerimisest on lähemalt juttu peatüki 2.3.1, "Rakise projekteerimine", all. LEM-arvutuste põhjal on näha, et laminaat on normaali sihis tõmmates kõige nõrgem ning kõik tõmbeteimi katsed teostati seetõttu normaali sihis tõmbele. 250 mm ava kinnitusankru tõmbamiseks on reeglitega ette nähtud ning antud ava kasutati kõikide 2-poldiavaga kinnitusankrute testimiseks ning hiljem ka turvavöö ja akukasti katsekehade testimiseks. Tõmbeteimi katse tegemiseks valmistati ka kinnituskõrv, mis kinnitati laminaadi külge, et oleks võimalik kinnitusankrut tõmmata. Täpsemalt on katsetuste tulemustest ning katseseadmete paigutusest juttu peatüki 3, "Kinnitusankrute projekteerimine ja katsetamine", all.

2.3.1. Rakise projekteerimine

Esimese ja teise laminaadigrupi katsetulemused andsid rakistuse tõttu ebatäpseid tulemusi ning seetõttu oli vajalik projekteerida uus katserakis. Meeskonna rahaliste ressurside ning tootearenduse aja piiratuse tõttu tuli projekteerida rakis, mis suudaks taluda ankrute katsetustel tekkivaid koormusi ning millega oleks lisaks võimalik läbi viia turvavöö kinnituste tugevuse tõestamiseks vajalikud katsed. Nõuded, millele kinnitusankrute katsetamise rakis vastama peab, on järgmised:

- Võimeline purunemata vastu võtma 30 kN suurust koormust
- Varutegur vähemalt 1.5x
- Transportimine peab olema võimalik kahe inimese koostöös
- Kinnitusankru tõmbeplaadi ava diameeter 250 mm
- Võimalik teostada laminaadi kinnitusankru tõmbamist ning surumist vahemikus 0° - 60°
- Lõtkudeta konstruktsioon, et oleks võimalik läbi viia tsüklilise tõmbe-surve olukorraga väsimuskatset.
- Peab võimaldama läbi viia turvavöö kõrva tõmbekatset sama nurga all nagu see on kere küljes ning vastama reeglile T3.41.4, mis ütleb, et rakise serv peab jõuvektorist asuma vähemalt 125 mm kaugusel.

Sele 2.4-1 on välja toodud pilt rakise lõplikust koostust:



Sele 2.4. Valmis rakise koost.

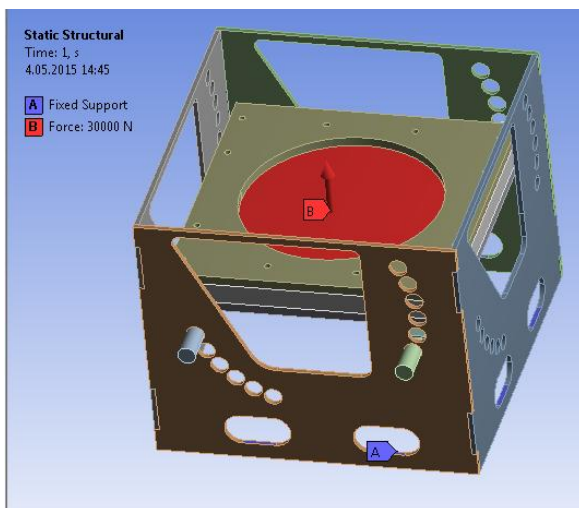
Rakis koosneb kahest eraldi osast. Sisemisest osast, kuhu kinnitub laminaat, ning välimisest raamist. Detailid on eraldatavad, et neid oleks mugavam käsitseda. Pildi esiplaanil on näha ka ümmargusi avasid ning polte. Nende abil on võimalik muuta rakise plaadi nurka töölaua

suhtes 60° kraadi ulatuses. Rakise iga külje alumises osas on kaks ovaalset ava, kuhu kinnituvad klambrid, et rakist oleks võimalik katseseadme töölaual külge kinnitada.

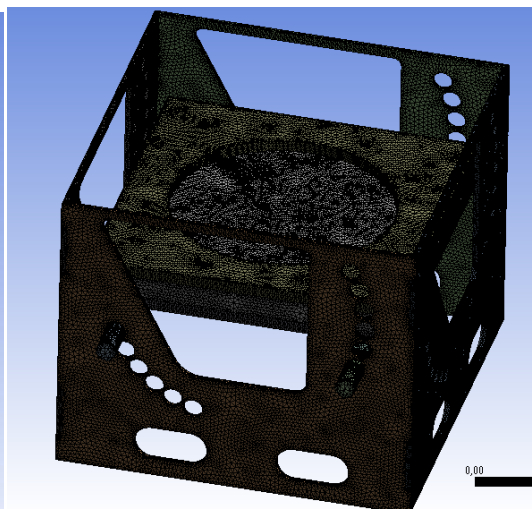
Peale seda kui rakise esialgne CAD-mudel valmis oli, tuli sellele teostada tugevusanalüüs veendumaks, et rakis peab nõutavatele jõududele vastu. Rakise välimise koostu külgseinu on optimeeritud, tagamaks koostu kergem mass ning lisaks on avad olulised, et rakise sisemist koostu oleks võimalik kinnitamise ajal paigal hoida. Tugevusarvutused viidi läbi programmiga Ansys 14.5.

Analüüsi rajatingimused on järgmised:

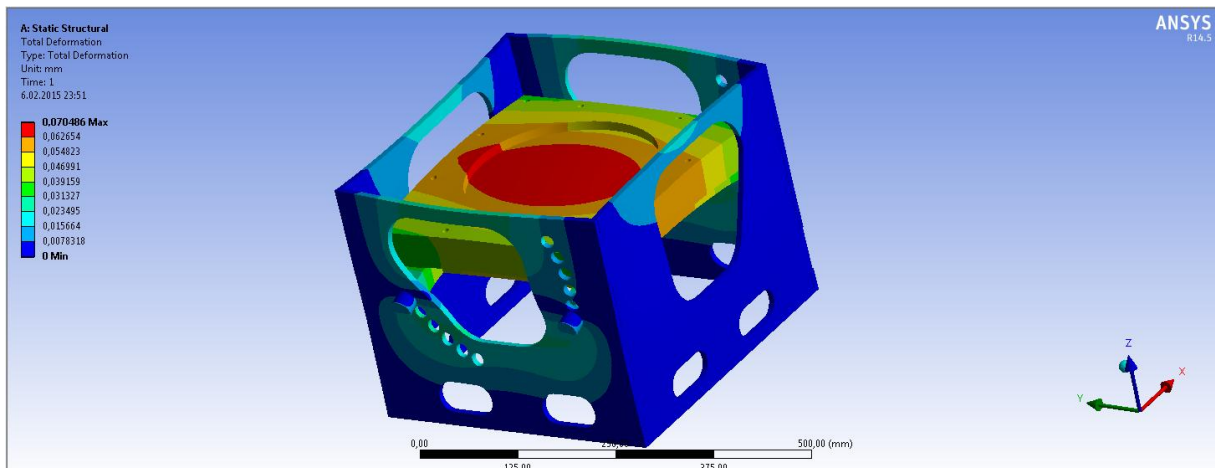
- Rakis fikseeriti jäigalt klambriava alumisest horisontaalsest osast (Sele 2.5 A)
- Laminaadi ja rakise kontaktiks määrati *frictionless support*. Mujal jäik ühendus.
- Laminaadile on rakendatud 30 kN suurune tõmbejõud (Sele 2.5 B).



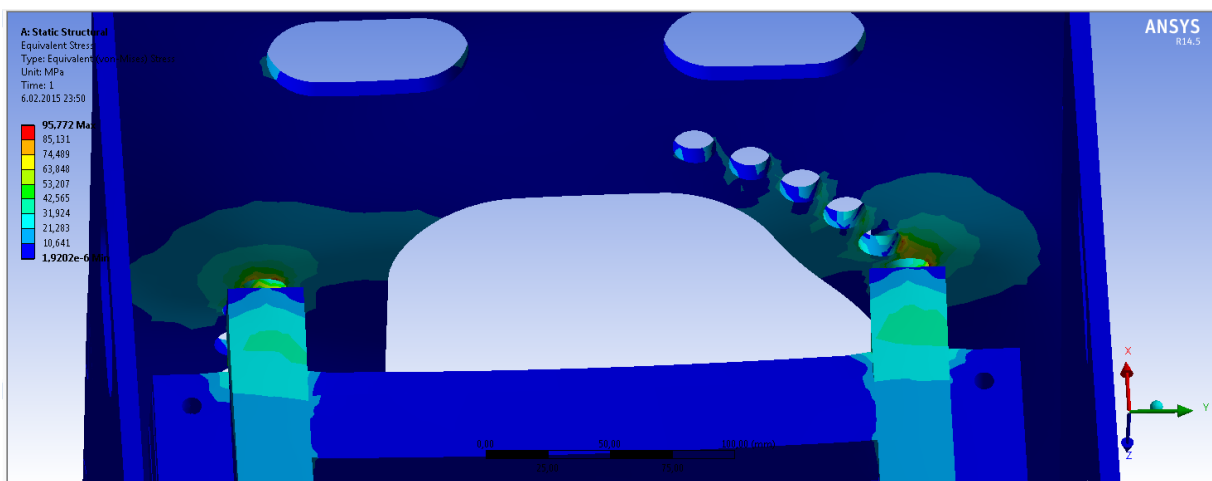
Sele 2.5. Analüüsi rajatingimused



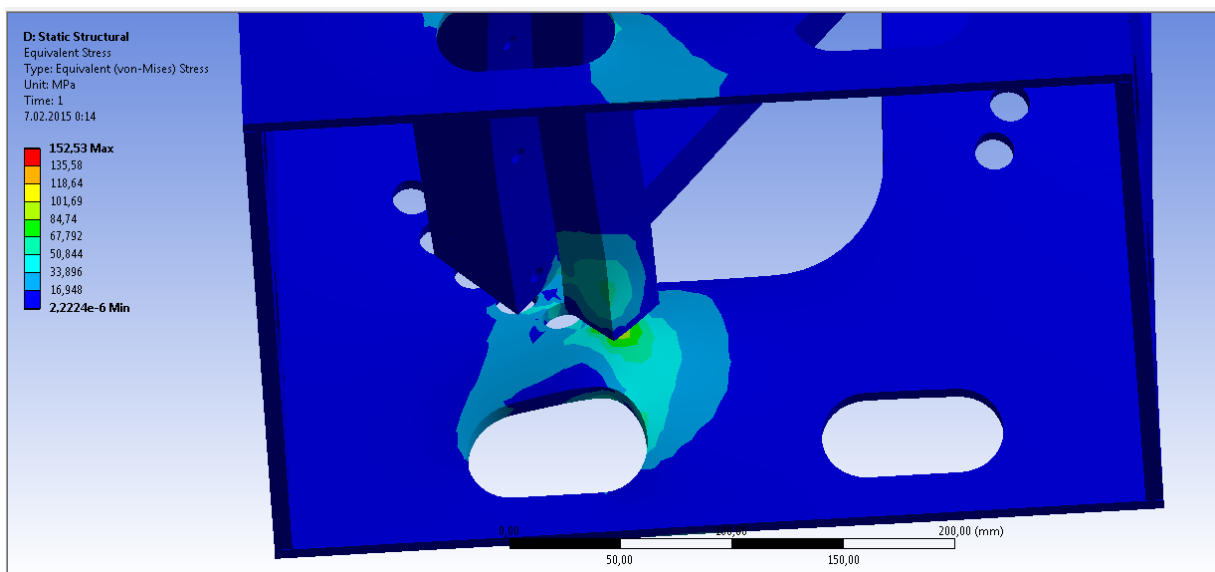
Sele 2.6. Elementide võrgustik (453 693 elementi)



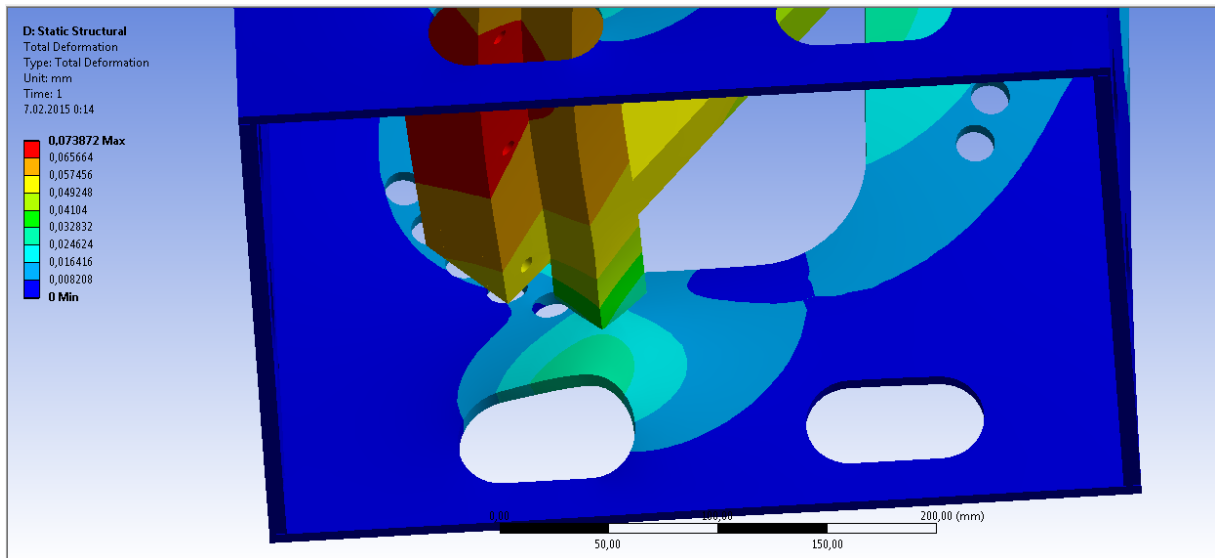
Sele 2.7. Rakise deformatsioon 30 kN suuruse normaalsihilise jõu korral.



Sele 2.8. Suurimate pingetega ala rakisel normaalsihilise jõu korral.

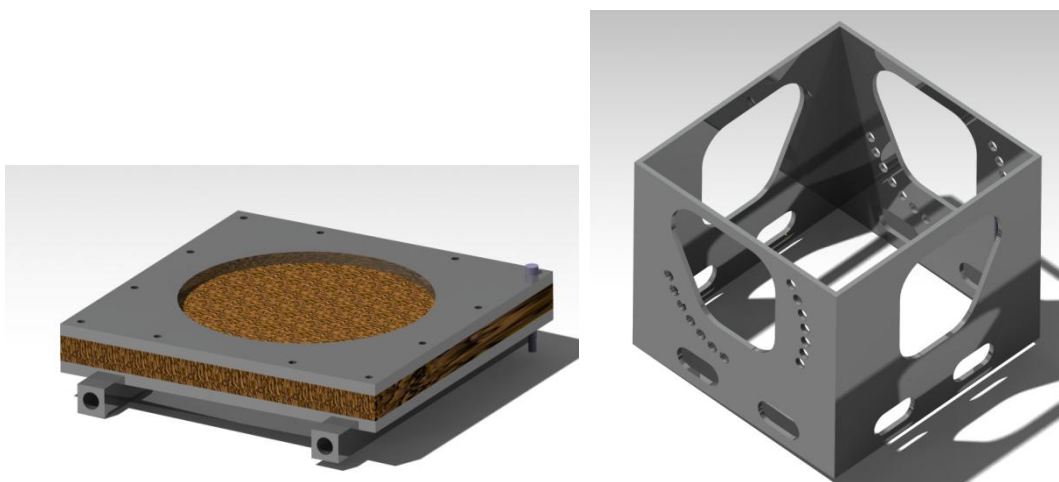


Sele 2.9. Suurimate pingetega ala rakise suurima töönurga, 60° korral.



Sele 2.10. Rakise deformatsioon suurima nurga korral (60°).

Tugevusarvutustest selgub, et suurimad pinged tekivad rakisesse olukorras, kui laminaati tõmmatakse 60° nurga alt. Analüüsi tulemust lähemalt hinnates on kõige nõrgemaks kohaks poldipea ja rakise sisemise koostu kokkupuutepind. Rakise minimaalne varutegur on 1,54 ning suurim deformatsioon 0,07 mm. Rakise sisemine koost kaalub 22 kg ning välimine korpus 25 kg. Laminaat kinnitub rakise sisemisele koostule kahe plaadi vahele, mis on omavahel ühendatud poltliitega. Sisemine koost kinnitub välimise raami külge samuti poltliitega, mille tõttu on tagatud lõtkuvaba ühendus. Järgnevalt on välja toodud rakise välimise ning sisemise osa koost eraldi:



Sele 2.12. Rakise sisemine ja välimine koost.

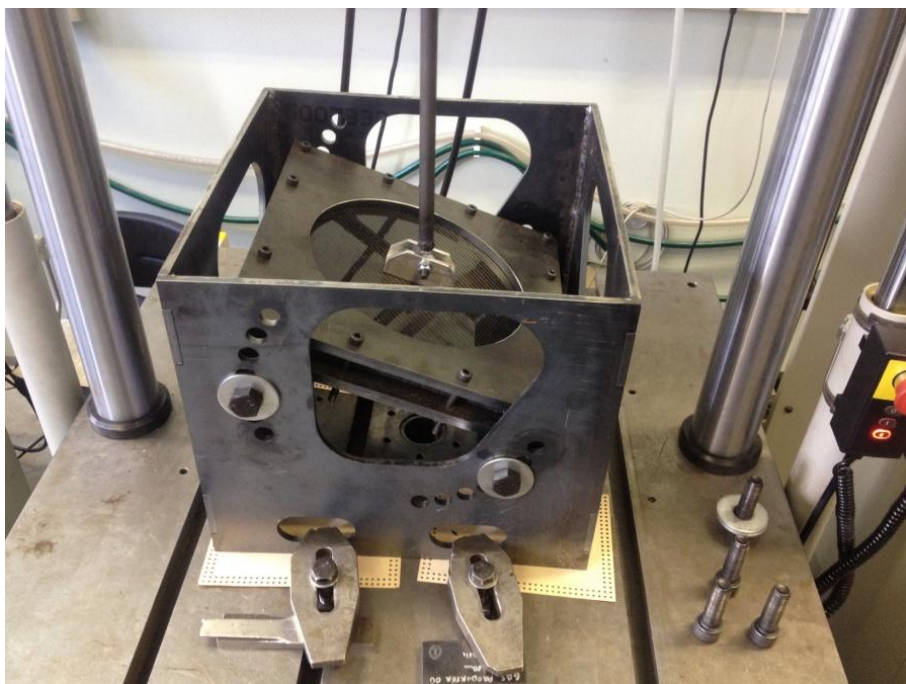
Pruuni ja musta mustriga on välja toodud komposiitmaterjalist katsedetail.



Sele 2.13. Rakise kasutamine laminaadi testimisel

2.4. Väsimusteimi meetoodika

Väsimuskatse korral kasutati rakist, mille projekteerimisest on juttu peatüki 2.3.1, "Rakise projekteerimine", all. Antud katse viidi läbi, et oleks võimalik hinnata laminaadi ning kinnitusankru eluiga ringrajal mõjuvate koormuste korral. Väsimuskatsetuse jaoks sai freesitud sobiv kinnituskõrv ning valmistati kuulliigendi kinnitamiseks sobiv toru. Järgneval seel 2.14 on välja toodud pilt väsimuskatsest.



Sele 2.14. Väsimuskatse rakistus

Laminaat asetati toru suhtes 20° nurga alla, mis imiteerib kõige suurema koormusega töötavat õõtshooba FEST15 vormelautol. Katse jaoks sai koostatud Rapla kardirajal mõjuvate jõudude tabel, mis võimaldaks täpselt imiteerida auto sõitu rajal ning anda hinnangu laminaadi reaalse vastupidavuse kohta. Järgnevalt on välja toodud Rapla rajal mõjuvad jõud, mis on võetud eelmise aasta elektrivormeli FEST14 logifailidest.

Tabel 2.2. Rapla kardirajal mõjuvad vedrustusejõud

| Jõud, N | Jrk nr | Jõud, N | Jrk, nr | Jõud, N | Jrk nr | Jõud, N | Jrk nr |
|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|
| -1887 | 1 | -1592 | 11 | 2400 | 21 | 2281 | 31 |
| 4572 | 2 | -1494 | 12 | -1410 | 22 | 1454 | 32 |
| 2250 | 3 | -1548 | 13 | -297 | 23 | -1475 | 33 |
| -1856 | 4 | 1895 | 14 | 2648 | 24 | -402 | 34 |
| 2781 | 5 | -1961 | 15 | 4922 | 25 | 4255 | 35 |
| -228 | 6 | 605 | 16 | -1798 | 26 | 2850 | 36 |
| 2271 | 7 | 390 | 17 | 3762 | 27 | -1944 | 37 |
| -1753 | 8 | 4160 | 18 | -1872 | 28 | -1651 | 38 |
| 2158 | 9 | 632 | 19 | -1045 | 29 | | |
| -1820 | 10 | -1176 | 20 | -1701 | 30 | | |

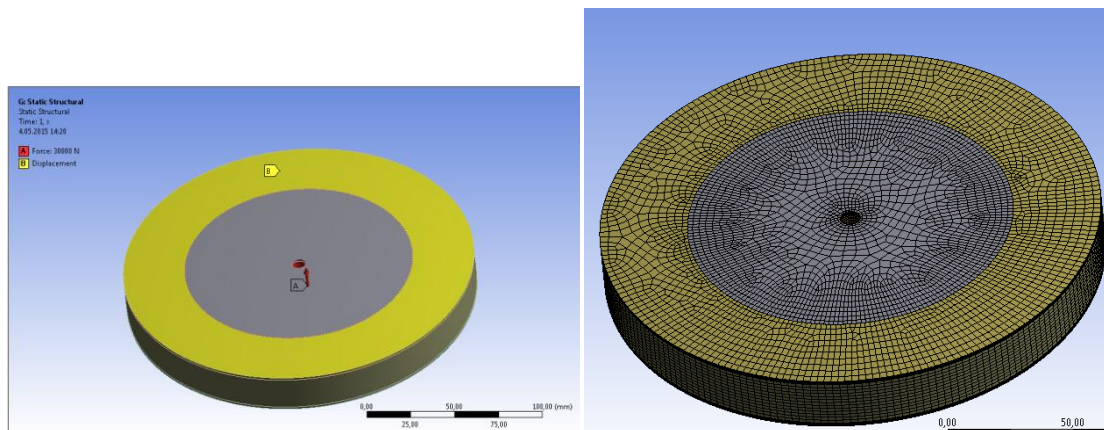
Antud tabelis on positiivse märgiga välja toodud survejõud ning negatiivse märgiga tõmbejõud. Punase värviga on välja toodud suurim tõmbe- ning survejõud. Üle 4000N suurust koormust talub auto Rapla ringi jooksul neli korda. Paraku ei saanud väsimuskatset teostada rajal mõjuvate jõududega ning seejärel otsustati katse teostada kahes osas. Esmalt vähemalt 50 000 tsüklit 5 kN suurust tõmbe- ning survekoormust, mis mõjub sinusoidaalselt ning kui laminaat veel terve on, siis 10 kN suurust sinusoidaalset tõmbe- ja survekoormust kuni detaili purunemiseni. Täpsemalt on tulemustest juttu peatüki 3.4.3, "Väsimuskatsetus", all.

3. KINNITUSANKRUTE PROJEKTEERIMINE JA KATSETAMINE

3.1 Esimene lahendus

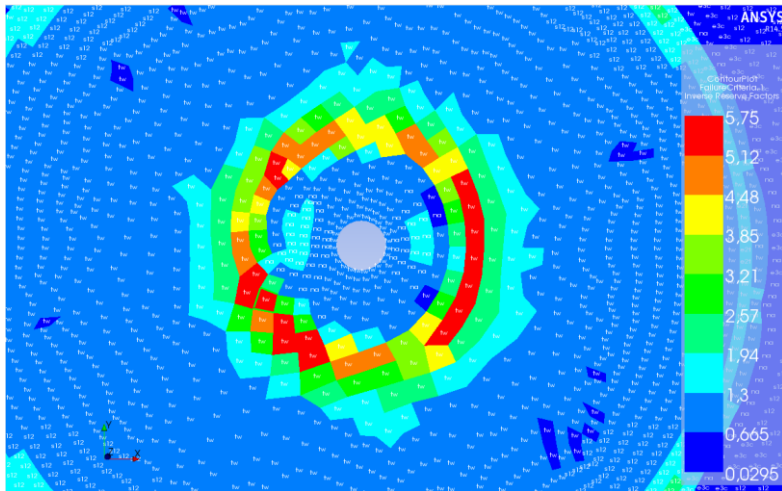
3.1.1. LEM

Esimese lahenduse korral kasutati Ansys-is ruumiliste elementidega analüüsi, et oleks võimalik hinnata kinnitusankrus ning vahus tekkivaid pingeid. Tõmbejõud rakendati kinnitusankru poldiavale ning laminaadi normaalisihilist liikumist piirati 130 mm diameetriga avaga, läbi mille tõmmati laminaati. Analüüsimudelil kasutati 148 580 elemendi suurust võrgustikku. Lisaks lihtsustati mõnevõrra analüüsimudelit, kuna tugevdusseibide, mutrite ja poltide lisamine analüüsi muutis arvutusaja ligi 24 h pikkuseks. Järgneval seel 3.1 on välja toodud laminaadi tugevusarvutuse rajatingimused ning elementide võrgustik.



Sele 3.1. Laminaadi tugevusarvutuse rajatingimused ning analüüsimudeli võrgustik

Esimese katsevooru katsekeha analüüsimisel 30 kN suuruse tõmbejõu korral selgus, et laminaadi deformatsioon on 8,1 mm ning ACP komposiidanalüüsi põhjal detail 30 kN suurust koormust ära ei kannata.



Sele 3.2. ACP tugevusanalüüsi pilt esimesest katsekehast

3.1.2. Katsetamine ning valmistamine

Peale tugevusanalüüsi valmistati vastavad katsekehad. Laminaadi materjalikihtide asetust valiti 2014. aasta FS Team Tallinna SES-ist (ing. k-SES-Structural Equivalency Spreadshet) ning katsekeha valmistati kõige suurema nihketugevusega külgnokkupõrke katsekeha järgi. Katsekeha materjalikihtide asetust alates välimisest kihist on järgmine: (tvill, biaktsiaal, klaasriie, uniaktsiaal, klaasriie, biaktsiaal)_s [(0)_s -sümmeetriline materjalikihtide asetust] ning kahe materjalikihi vahel on 19 mm paksune vaht. Katsekeha mõõtudeks on 300 mm x 600 mm ning ühele plaadile on paigutatud 2 erineva kujuga kinnitusankrut, mis hiljem laminaadist välja tõmmatakse. Antud detailis eraldi tugevduslappe ei kasutatud ning kõik materjalikihid asetsevad terve detaili ulatuses. Lisaks valmistati teine paneel, kus kasutati kinnitusankru ning esimese klaasriide kihi vahel aramiidi, mida kasutatakse eelkõige kuulivestides tänu võimele neelata energiat paremini kui süsinikkangas [21]. Esimesed katsekehad valmistati infusioonmeetodil ning kasutati West System 114 vaiku koos keskmise kiirusega kõvendiga INF 211 [7]. Järgnevalt on välja toodud vaigu ja kõvendi mehaanilised omadused erinevate järelkõvendamisaegade korral.

Tabel 3.1. INF114 ja INF211 vaigu ja kõvendi mehaanilised omadused [7]

| Property | Standard | Units | 22°C x 4 Weeks | 25°C x 2 Weeks | RT Gelation + 49°C x 8 hrs | RT Gelation + 60°C x 8 hrs | RT Gelation + 82°C x 8 hrs |
|--------------------|------------|---------|-------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Hardness | ASTM D2240 | Shore D | 86 | 86 | 85 | 85 | 85 |
| Compression Yield | ASTM D895 | MPa | 101 | 105 | 94 | 94 | 94 |
| Tensile Strength | ASTM D638 | MPa | 54 | 59 | 66 | 68 | 70 |
| Tensile Modulus | ASTM D638 | GPa | 3.61 | 3.68 | 3.69 | 3.52 | 3.36 |
| Tensile Elongation | ASTM D638 | % | 1.7 | 2.0 | 2.6 | 3.9 | 5.3 |
| Flexural Strength | ASTM D790 | MPa | 85 | 103 | 118 | 121 | 125 |
| Flexural Modulus | ASTM D790 | GPa | 3.34 | 3.33 | 3.43 | 3.41 | 3.2 |

Graafikul oleva info põhjal võib järeldada, et peale lamineerimist peavad detailid läbima 8 tunni pikkuse järelkõvendamise 82 °C juures, saavutamaks parimaid mehaanilisi omadusi. Võrreldes toatemperatuuril seisnud vaiguga on järelkõvendamise läbinud vaigu tõmbetugevus ligi 23 % kõrgem ning paindetugevus 32 % kõrgem.

Järgnevalt on välja toodud laminaadis kasutatud kinnitusankrute kujud ning nende kaalud. Mõlemas laminaadis oli üks silindriline kinnitusankur (vasakul) ning teine niidirulli kujuline (parempoolne pilt).

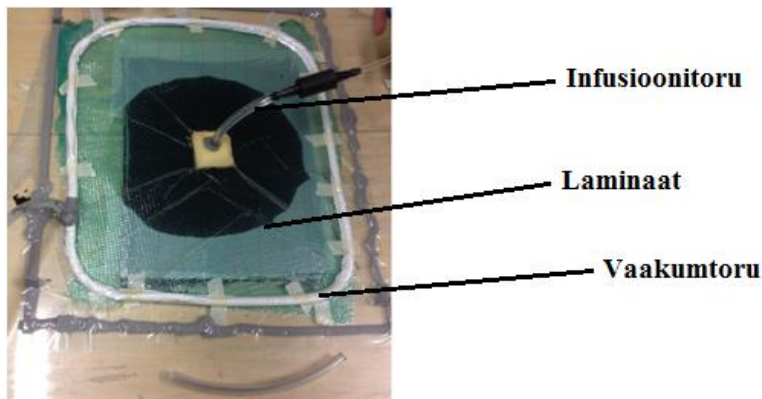


Sele 3.3. Kinnitusankrute kujud ning kaalud.

Juuresolevalt pildilt on võimalik näha, et silindriline kinnitusankur kaalub 99,1 g ning niidirulli kujuline kaalub 65,1 g. Kahe erineva geomeetria rohkem kui 33 % kaaluerinevus omab kogu auto seisukohalt väga suurt rolli, kuna FEST15 vormelautol on peal 89 kinnitusankrut ning ainuüksi kergema lahenduse kasutamine annaks 3026 g võitu, mis on võistlusauto kohta väga suur kaaluvõit.

Katsekehad valmistati täpselt sama moodi nagu valmistatakse monokokk-kere. Esmalt infusioonitakse ära välimine materjalikiht, seejärel liimitakse vaht infusiooniliimiga juba eelnevalt infusioonitud välimise kihi külge ning kinnitusankrud liimitakse omakorda vahu ning välimise materjalikihi külge West System 404 täidismaterjaliga, mis on segatud INF114 vaigu ja INF211 kõvendiga.

Täidismaterjali kasutatakse olukordades, kui liimitavate detailide vahel esineb tühimikke ning vajalik on saavutada suur tsükliline vastupidavus koormustele [8]. Täidismaterjali suure viskoossuse tõttu ümbritseb see kinnitusankru välispinna ning tekitab tugeva monoliitse ühenduse vahu ning kinnitusankru vahele. Järgneval pildil on näha välise materjalikihi infusioonimist ning erinevate vaakum- ning vaigutorude paigutust.



Sele 3.4. Välise materjalikihi infusioonimine

Katsekehad on valmistatud klaasi peale. Klaasi on eelnevalt töödeldud Loctite-i vormieraldusvahenditega, et detail tuleks vormist probleemideta välja. Laminaadi peale on asetatud eraldusriie, mis tagab, et hiljem oleks võimalik võrk, kile ning voolikud laminaadi pealt ilma laminaati kahjustamata eraldada. Lisaks jätab eraldusriide kasutamine laminaadile kareda pinna, mida ei ole vaja enne järgmiste kihtide lamineerimist eraldi karestada [9]. Võrku kasutatakse eelkõige parema vaakumi ning vaigu levimise pärast [10]. Sele 3.4 pealt on näha detaili ümbritsev valge voolik. Tegemist on MTI vaakumtoruga [11]. MTI vooliku eeliseks traditsioonilise vaakumvooliku ees on membraanist kate, mis katab spiraalvoolikut ning mis laseb läbi õhku, kuid mitte vaiku. MTI voolikute kasutamisel on tavapärase spiraalvooliku ees mitmeid eeliseid [11]:

- Nõelasilmadefektideta laminaat, mis ei vaja järeltöötlust, kuna saavutatakse perfektne vormipoolne pind.
- Infusiooniprotsessi ülesseadmine on oluliselt kiirem, kuna ei pea kasutama vaigulukke, mida kasutatakse tavalise spiraalvooliku korral ning mille ülesandeks on vaigu liikumise takistamine vaakumvoolikusse.
- MTI voolik tagab infusiooniprotsessi käigus ühtlase vaakumi jaotuse detailis, mille tõttu laminaadi kuivaks jäämise tõenäosus on oluliselt väiksem kui tavalise spiraalvooliku korral.
- MTI vooliku kasutamisel on õhumullide osakaal laminaadis väiksem
- Võimalik saavutada suur kiu konsentratsioon, mille tõttu laminaat peab paremini vastu dünaamilistele koormustele
- Vaigu kulu infusioonimisel on väiksem, kuna vaiku ei lähe kaduma vaigulukkudesse.

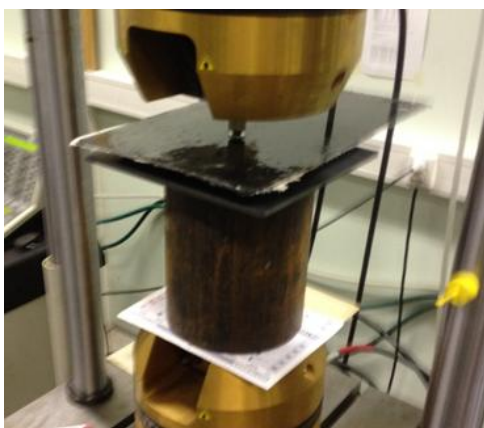
Lisaks on sele 3.4 peal näha vahtplastist valmistatud detail vaigu jaotamiseks laminaati. Infusioonivooliku vahele on paigaldatud ka MTI klapp, mis ühtlustab rõhkude vahet laminaadis ning aitab tagada parema kvaliteediga detaili. Vaigu voolamise järgi on näha, et MTI voolik aitab sellel ühtlaselt levida, mis aitab vältida vaigutühimike teket laminaadis.

Peale lamineerimist hinnati laminaadi kvaliteeti ka Imperium AcoustoCam i600PE ultraheliskanneri abil ning selgus, et laminaat on väga poorne. Võimalikke defektide põhjustajaid on mitmeid. Esimene ja kõige realsem variant on see, et vorm ei olnud piisavalt õhutihe ning enne vaigu kõvenemist pääses õhk vormi, mille tõttu tekkisid detaili poorid. Lisaks jäi laminaat ka osaliselt kuivaks. Infusioonimise lõppfaasis hakkas MTI klapp vaigu pealevoolu liialt pidurdama, mistõttu jäi detail osaliselt kuivaks. Tulevikus otsustati antud klapi kasutamisest loobuda ning ise vaigu pealevoolu reguleerida.



Sele 3.5. Imperium AcoustoCam i600PE ultraheliskanner [12]

Kinnitusankru mehaanilised katsetused viidi läbi TTÜ katselaboris Instron 8802 masinal.



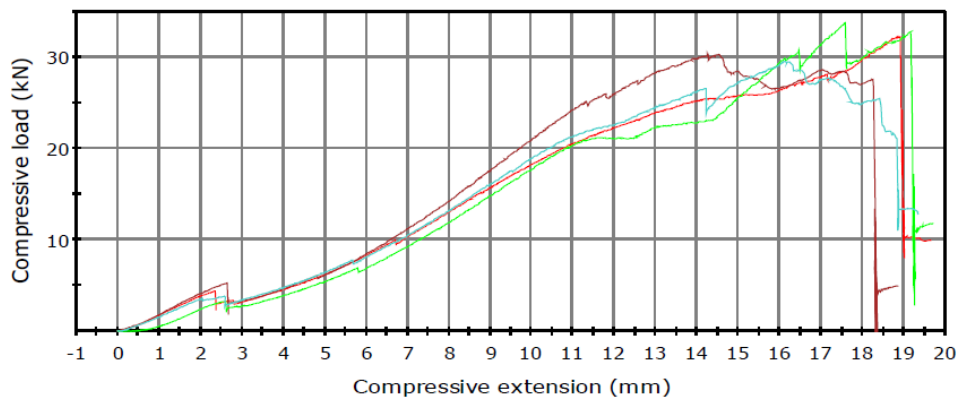
Sele 3.6. Esimese lahenduse katsetamine

Esimese katse teostamisel suruti poldipead ning laminaadi alla oli asetatud 130 mm diameetriga plaat, läbi mille kinnitusankrut suruti.



Sele 3.7. Purunemine esimese lahenduse korral

Tõmbepingete tulemusena tekkisid laminaati nihkepraod, mida on näha seel 3.7. Laminaat purunes kinnitusankrute ning vahu kontaktpinna koha pealt. Laminaadi tugevust näitab järgmine graafik:



| | Specimen label | Comment | Maximum Compressive load (kN) |
|---|----------------|---------|-------------------------------|
| 1 | 1-1 | | 32,23 |
| 2 | 1-2 | | 30,29 |
| 3 | 2-1 | | 33,76 |
| 4 | 2-2 | | 29,54 |

| | Compressive extension at Maximum Compressive load (mm) |
|---|--|
| 1 | 18,8 |
| 2 | 14,5 |
| 3 | 17,6 |
| 4 | 16,1 |

Sele 3.8. Esimese lahenduse survegraafik

Sele 3.8 on näha survegraafikud 4 erineva kinnitusankru kohta. Järgnevas tabelis 3.2 on näha katsekehade omavahelist võrdlust. X-täht tähendab geomeetria või aramiidkanga olemasolu (pandi 1 kiht laminaadi mõlemale poolele kinnitusankru vastu).

Tabel 3.2. Esimese lahenduse katsekehade võrdlus

| Katsekeha nr. | Niidirull | Silindriline | Aramiidi olemasolu |
|---------------|-----------|--------------|--------------------|
| 1-1 | x | | x |
| 2-1 | x | | |
| 1-2 | | x | x |
| 2-2 | | x | |

3.1.3. Järeldused

Analüüsimudeli ning reaalse laminaadi katsetuse tulemused erinevad teineteisest märgatavalt:

- Analüüsimudeli järgi on 30 kN suuruse koormuse korral laminaadi läbipaine 8,1 mm, reaalselt oli 8,1 mm suurune läbipaine 15 kN juures.
- ACP järgi on laminaat 4,5 korda nõrgem kui 30 kN suuruse koormuse vastupidamiseks vaja. Reaalselt pidas katsekeha 30 kN suuruse koormuse vastu.
- Laminaadi survegraafikult on näha, et esimene purunemine toimub detailis umbes 4 kN suuruse jõu juures, kuid ACP järgi seda juhtuda ei tohiks.
- Laminaadi tugevusanalüüsist on näha, et nõrgimaks kohaks on kinnitusankru ning vahu vahele jääv ala, kust laminaat puruneb. Hinnates reaalse katsekeha purunemist, vastab see tõele. Laminaat purunes täpselt kinnitusankru ning vahu kontaktpinnalt.

Katsetamise tulemustest võib järeldada, et aramiidlehe lisamine ei lisa detailile tugevust.

Reeglites on nõue, et turvakaarte kinnituspunkt peab olema suuteline kannatama igas suunas välja 30 kN suurust koormust ning juba esimese katsega on näha, et nõue on täidetud. Probleeme võib tekitada hoopis kinnitusankru eluiga. Graafikult on näha, et umbes 4 kN juures toimub katsekehades esimene suurem purunemine, mis on selgelt liiga madalal, kuna vedrustuse jõud, mida sama kinnitusankur kandma peab hakkama, ulatuvad 7 kN-ni. Võistlustele pääsemiseks nõutavasse dokumentatsiooni antud katse tulemused küll sobivad, kuid vähem kui 1x varutegur pole piisav. Rahuldava tulemuse saamiseks on

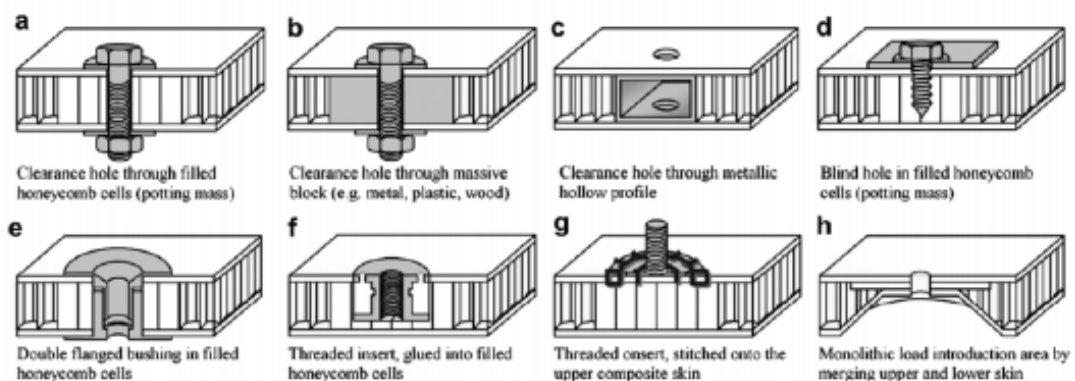
vaja tõsta laminaadis tekkiva esimese kihi purunemine vähemalt 20 kN juurde, mis tähendaks vedrustuse jõudude korral 3 kordset varutegurit. Lisaks peab olema täidetud 30 kN suuruse jõu vastu võtmine enne lõplikku purunemist. Katsetatud detaili vaadeldes selgus, et kinnitusankur suruti laminaadist välja ning kinnitusankru pinda analüüsid on näha, et West Systemi täidismaterjal ei ole loonud tugevat liidet ankur ning vahu vahele.

3.2 Teine lahendus

3.2.1. Võimalikud lahendused

Kinnitusankrute projekteerimist jätkati nende kuju parendamisest. Esimese lahenduse katsetus näitas, et tavaline silindriline kinnituspunkt lõhub materjalikihid väga kiirelt ehk Z-telje suunas on materjali nihketugevus liialt madal. Lisaks ei hoidnud West Systemi täidismaterjal kinnitusankrut piisavalt hästi vahu küljes kinni, mille tõttu katsetulemused olid samuti nõrgad.

Esmalt alustati infootsinguga, et kindlaks teha erinevaid kasutusel olevaid kinnitusankruversioone. Sele-l 3.9 on välja toodud peamised kasutatavad ankrujud.



Sele 3.9. Võimalikud kinnitusankrute geomeetriad [13]

a) Läbi laminaadi on puuritud ava ning kärje sisemus on täidetud vaiguga. Antud lahenduse tugevus sõltub suuresti sellest, kui hästi on õnnestunud kärje täitmine vaiguga. Juhul, kui kärp pole täielikult täitunud, surutakse see poldi kinni keeramisel kokku ning laminaat kaotab oma tugevusomadused.

b) Detaili sisse on lamineeritud monoliitne ankur, mis ei lase laminaadil deformeeruda polti kinni keerates. Lisaks on antud lahenduse korral kinnituspunkti vastupanu jõududele samuti suurem kui a) tüübi kinnitusmeetodil. Antud lahenduse miinuseks on suur mass.

c) Detaili sisse on lamineeritud seest tühi profiil. Antud lahenduse eeliseks on võime taluda kõrgeid koormusi ning kinnitusankur ise on suhteliselt kerge. Liimipindala suurus on sarnane võrreldes punktis b) välja toodud lahendusega. Antud ankru kasutamine oleks õigustatud laminaatides, mis on valmistatud eelimpregneeritud kangast kuna infusioonides läheb antud detail seest vaiku täis. Teine võimalus on kinnitusankur õhukindlalt kinni keevitada, materjali sisse lamineerida ning hiljem läbi puurida, kuid ka see on halb idee, kuna hilisem puurimine soojendab kinnituspunkti, mille tõttu ankru ning vahu vaheline side nõrgeneb. Vaadates vaigu andmelehte, on sealt võimalik näha, et vaigu klaasistumistemperatuur on 85°C.

Soojusomadused

| Property | Standard | Units | 22°C x 4 Weeks | 25°C x 2 Weeks | RT Gelation + 49°C x 8 hrs | RT Gelation + 60°C x 8 hrs | RT Gelation + 82°C x 8 hrs |
|------------------------------|--------------|-------|-------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Tg DMA Peak Tan Delta | ASTM E1640** | °C | 70 | 70 | 80 | 91 | 102 |
| Tg DMA Onset Storage Modulus | ASTM E1640** | °C | 63 | 63 | 69 | 80 | 91 |
| Tg DSC Onset - 1st Heat | ASTM E1356 | °C | 59 | 59 | 66 | 74 | 81 |
| Heat Deflection Temperature | ASTM D648 | °C | 54 | 55 | 62 | 71 | 78 |
| Tg DSC Ultimate | ASTM E1356 | °C | | | 85** | | |

Sele 3.10. Vaigu soojuslikud omadused [7]

Juhul kui vaigu temperatuur kerkib üle klaasistumistemperatuuri, muutub vaig pehmemaks ning ei ole võimeline koormust armatuurini juhtima, mille tõttu väheneb ka laminaadi jäikus [14].

d) Kärje sisemus on vaiguga täidetud ning kruvi alla on asetatud plaat. Antud lahendus töötab efektiivselt survele kuid tõmbele töötamise võime puudub või on väga madal. Kruvi või poldi alla asetatud plaat võimaldab laminaati mõjuvad jõud paremini laiali jaotada.

e) Kärge on jällegi täidetud vaiguga ning laminaati on mõlemalt poolt pandud flantsid, mis omavahel kokku liimituna moodustavad monoliitse liite. Antud lahendus töötab võrdselt hästi nii survele kui ka tõmbele. Lahenduse miinuseks on see, et kinnitusankur tuleb laminaadi peale ning kui on soov sinna detail kinnitada, tuleb kasutada vaheplaati.

f) Kärge on täidetud vaiguga ning osa kärjest on laminaadist välja puuritud. Tühimik on omakorda täidetud vaiguga ning sinna sisse on asetatud kinnitusankur. Antud lahenduse miinuseks on eelkõige valmistamise keerukus, kuna kõik detailid tuleb üks haaval vaiguga

liimida ning protsess on seetõttu aeglane. Lisaks töötab antud lahendus suures osas ainult survele, kuna tõmbamise korral ei takista miski peale vaigu lahenduse purunemist.

g) Laminaadi sisse avasid puuritud pole ning kinnitusankur on liimitud materjalikihi külge. Antud lahendust kasutatakse eelkõige olukordades, kus laminaadile mõjuvad jõud ei ole suured ning oluline on fikseerida mõne kerge detaili asend nagu näiteks elektrikarp. Antud kinnitusmeetod töötab kõige paremini nihkele ning survele.

h) Laminaadis eraldi kinnitusankur puudub. Täidismaterjali on faasitud nii, et sisemine ja välimine materjalikiht puutuvad omavahel kokku. Antud lahenduse eeliseks on hea jõudude ülekanne laminaati, kuna laminaadikihtides töötavad ka X- ja Y-suunalised kiud. Tavapärase kinnitusankrute korral nagu on välja toodud seel 3.9 b), töötavad eelkõige kanga Z-telje suunalised kiud. Antud kausikujulise lahenduse miinuseks on madal paindejäikus, kuna polt ning mutter asetsevad teineteisele väga lähedal. Antud kinnituspunkti lahendus töötab väga hästi nii survele, tõmbele kui ka nihkele.

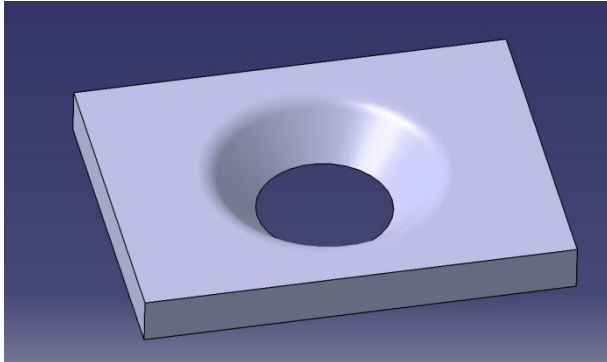
3.2.2. LEM

Formula Student sarjas kehtivate reeglite järgi peab auto turvakaare kinnitus monokoki küljes taluma 30 kN suurust jõudu iga telje sihis. Esimene laminaadikatsetus näitas, et tavaline silindriline ankur ei ole piisavalt tugev ning vedrustuses ei saa antud lahendust samuti kasutada. Projekteeritav kinnitusankur peab olema võimalikult kerge, et seda oleks võimalik kasutada ka vedrustuses ning seetõttu on oluline ka laminaadi esimene purunemine.

Esmalt alustati CAD programmis Catia V5R21 erinevate ankrukujude modelleerimisega. Kuna 40mm diameetriga ring ei olnud oma tugevusomadustelt piisav, analüüsiti veelgi suurema diameetriga kinnitusankrut. Sobivaks diameetriks, mis oli suuteline kandma koormust eelnevat mainitud eelmise aasta tugevaima nihketugevusega laminaadiga, oli 100 mm ning sel juhul kaalus kinnitusankur 500 g, mis ei ole vastuvõetav. Seejärel alustati erinevate geomeetriate analüüsimisega, kuid kuna analüüside tulemused jäid ikkagi samasse suurusjärku ning polnud piisavad, oli selge, et laminaadi paksune kinnitusankur ei ole piisav.

Järgnevalt analüüsiti, kuidas oleks võimalik rakendada kinnitusankrule koormusi nii, et kiud töötaksid lisaks Z-telje sihile ka X- ja Y- sihis. Koostati analüüsimudel, mis sarnaneb seel 3.9 h) näidatud lahendusega. Antud lahenduse analüüsimisel selgus, et pingete jaotus laminaati on

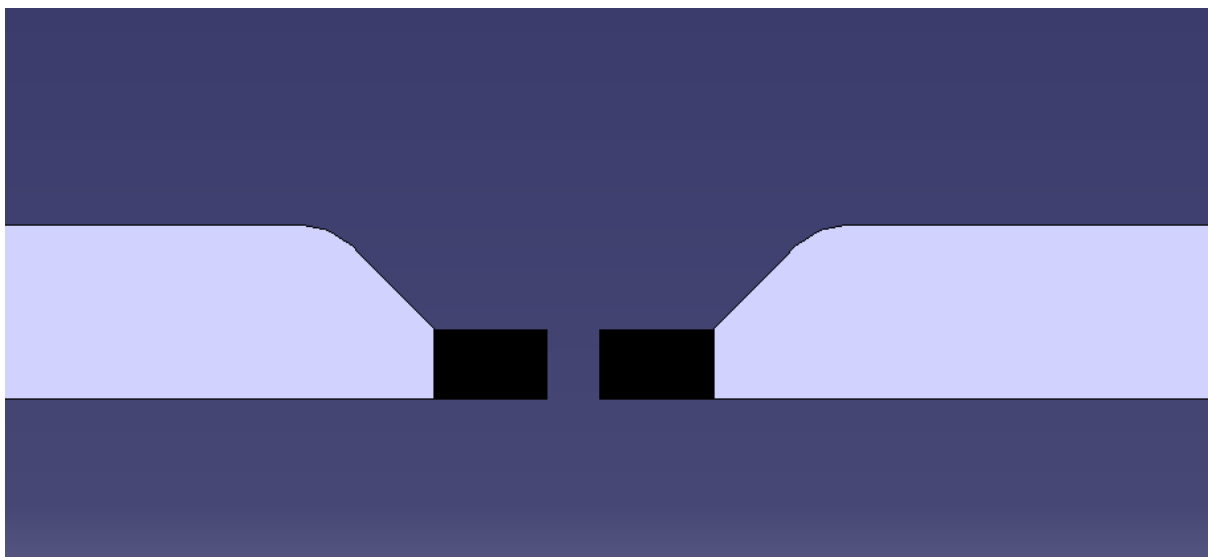
palju ühtlasem ning pingekonsentraatorit, mis laminaadi paksuse kinnitusankru korral tekib vahu ning ankrude kontaktpinnale, ei teki. Kausikujuline lahendus ei olnud samas piisavalt tugev, kuna sisemise ja välimise materjalikihi kokkupuutekohas on materjali ristlõikepindala ja materjali paksus oluliselt väiksemad kui kausi kõrval. Antud põhjusel on erineb kinnituskõrva jäikus oluliselt ülejäänud laminaadist ning kinnituskoht puruneb. Antud lahendus sobib hästi kandma keskmise suurusega koormuseid, kuid 30 kN antud lahendus ära ei kannata.



Sele 3.11. Kausslahenduse vahu kuju

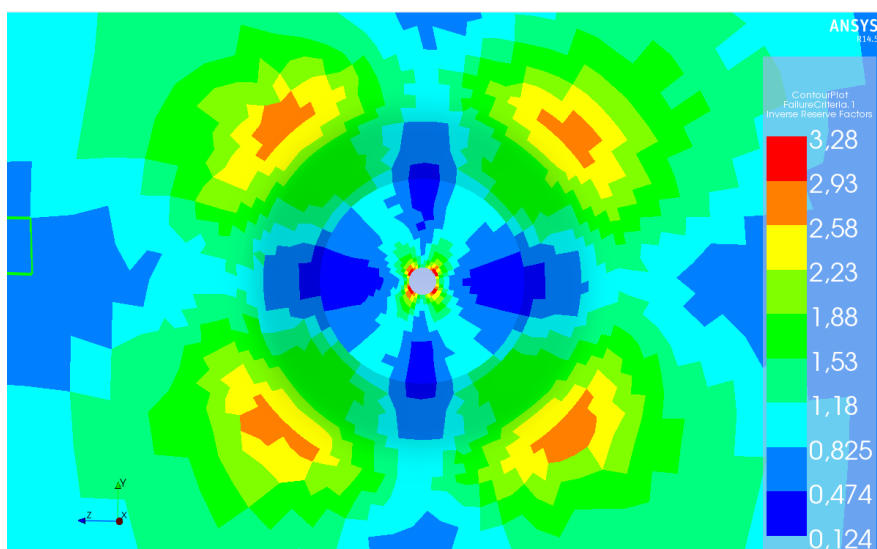
Kauss-lahenduse analüüsides oli näha, et antud lahenduses kannavad materjali kiud paremini koormust ning pingekonsentraatorite hulk ankrude ja vahu vahel on väiksem. Antud põhjustel jätkati idee edasiarendust.

Järgnevalt prooviti paigutada 25 mm paksuse vahu sisse 10 mm paksune kinnitusankur. Eelneva lahenduse korral laminaadis eraldi kinnitusankrut polnud ning kogu jõu võtsid vastu kaks õhukest materjalikihti, mis ümbritsesid vahtu mõlemalt poolt. Vahu faasi sügavust muudeti 25 mm pealt 15 mm peale ning viidi läbi uued simulatsioonid. Kinnitusankru kujuna kasutati ümmargust silindrit. Järgneval seel 3.12 on välja toodud laminaadi ristlõige, kus halli värviga on välja toodud vahu geomeetria ning musta värviga kinnitusankur.

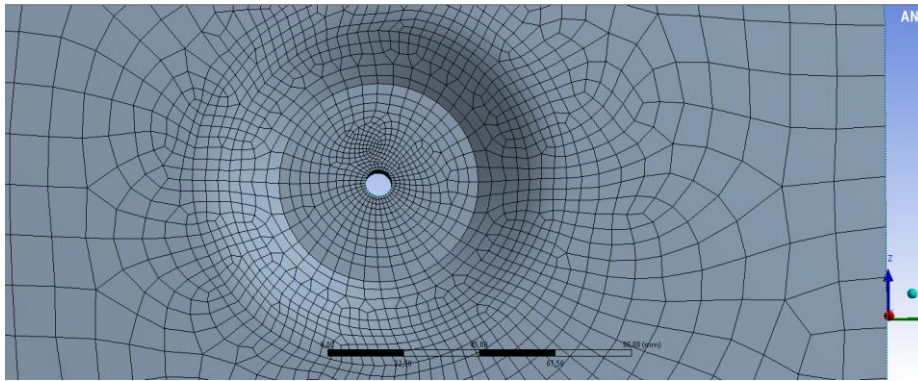


Sele 3.12. Ümmargune kinnitusankur ning kausi-kujuline vaht

Järgnevalt on välja toodud laminaadi tugevusarvutused:



Sele 3.13. Kausikujulise laminaadi tugevusarvutus.



Sele 3.14. ACP mudeli elementide võrgustik (111 555 elementi)

Simulatsiooni rajatingimused on samad, mis esimese lahenduse analüüsimise korral. Sele 3.13 paremas servas on näha skaalat, mis lõpeb 3,28-ga. Tegemist on pöördvaruteguriga, ehk kui detaili pöördvarutegur on üle 1, siis laminaat puruneb. Vaadatud on kõiki laminaadi kihte koos ning on näha, et suurimad pinged tekivad vahu ülemise raadiuse peale, mis on hea, kuna sellisel juhul on eemaldatud pingekontsentraator kinnitusankru ning vahu kontaktpinnalt, mis enamasti osutub laminaadi nõrgimaks lüliks. Antud pingelukorda on võimalik veelgi leevendada, kui suurendada kinnitusankru ja vahu vahelist kontaktpinda, mille tulemusena tekkivad nihkepinged jaotuksid suuremale alale laiali.

Kuna paljud võistkonnad kasutavad süsinikust valmistatud kinnitusankruid valmistati katsekehad, kus kinnitusankrute geometria oli täpselt samasugune ning ainsaks erinevuseks oli materjal. Ühel juhul oli kasutusel alumiinium 6082 T6 ning teisel juhul süsinik. Testitud sai mõlemat ankru kuju, nii ühe kui ka kahe avaga .

10 mm paksuse süsinikplaat otsustati valmistada ise, kuna Internetist tellides oleks 2 kinnitusankru materjal maksma läinud ligi 80 eurot [15] ning sobivate mõõtudega plaat oli võimalik valmistada materjalijääkidest. Järgneval sele 3.15 on välja toodud süsinikankrud, mis on asetatud välimise materjalikihi peale.

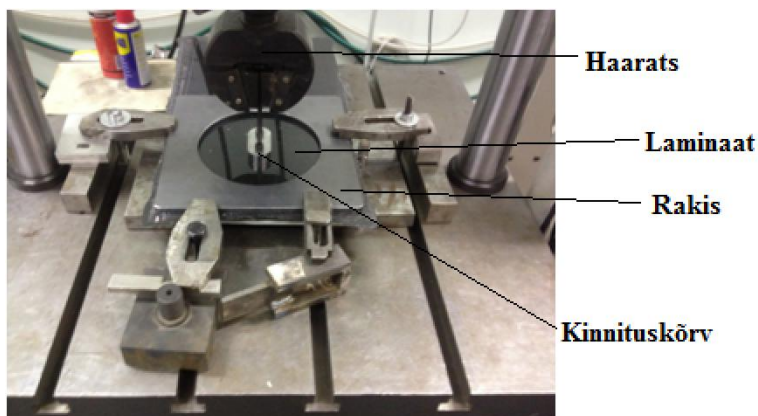


Sele 3.15. Süsinikust valmistatud kinnitusankrud

Seoses eelmiste katsekehade madala tugevusega esimesele purunemisele, analüüsiti võimalike tugevduslappide kasutamist ning otsustati kasutada biaksiaali $-45^{\circ}/45^{\circ}$ suunalisi tugevduslappide mõlemal pool kinnitusankrut. Tugevduslappide diameetrikks olid 100 mm ja 130 mm ning väiksem tugevduslapp asus kinnitusankrule lähemal. Biaksiaal $-45^{\circ}/45^{\circ}$ suunalisi tugevduslappide kasutati, kuna materjali tekivad nihkepinged 45° nurga all ning antud kiht tõstab laminaadi üldist nihketugevust. Katsekehad otsustati valmistada märglamineerimise teel, kuna sel juhul on erinevate laminaatide kvaliteet omavahel võrreldav. Infusioonimise korral on muutujaid palju enam ning mõne kanga kuivaks jäämise korral on laminaadi tugevus oluliselt madalam. Lamineeritud katsekehade massiks tuli 1-poldiavaga lahenduse korral 970 g ning 2-poldiavaga kinnitusankru korral 954 g. Kihtide paigutus oli järgmine: (tvill 0° , biaksiaal 0° , uniaksiaal 0° , biaksiaal 0° , 2x biaksiaali tugevduslapp 45°),. Mõlemat materjalikihti eraldas 25 mm paksune vaht.

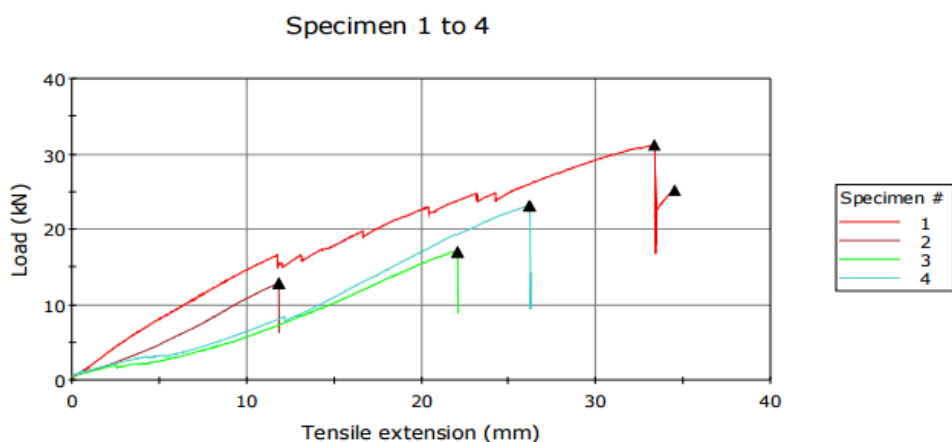
3.2.2. Katsetamine

Valmistatud katsekehade tugevust testiti Instroni pingiga. Järgneval selil on näha üles seatud kinnitusankru katset.



Sele 3.16. Teise katsekehade grupi katsetamine

Erinevalt esimesest materjalikatsetustest valmistati seekord kahe avaga katsekeha kinnitusankru tõmbamiseks. Sele 3.16 on näha detaili tõmbamiseks kasutatav kinnituskõrv, mis on freesitud S235 terasest ja 6 mm paksune laserlõikuses lõigatud rakise plaat, mis hoiab laminaati töölaua küljes ning mille sees on 250 mm diameetriga ava, läbi mille laminaati tõmmatakse. Antud ava mõõt on paika pandud FSAE reeglitega [5].

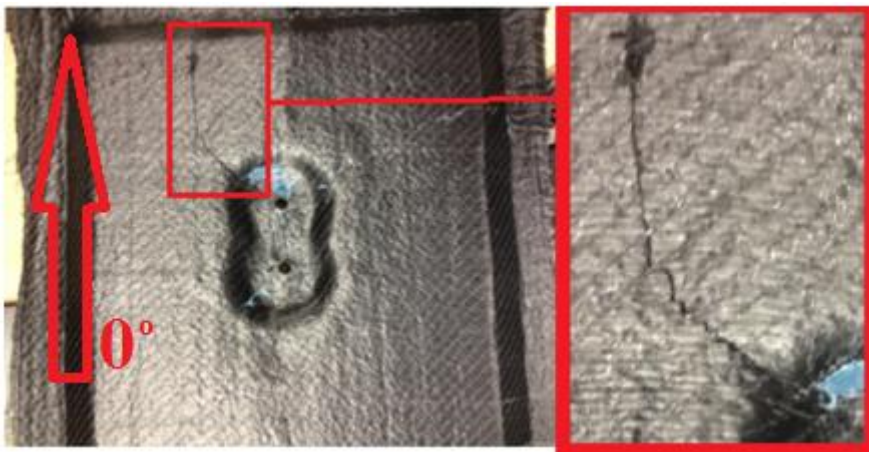


| | Specimen label | Maximum Load (kN) | Load at Break (Standard) (kN) | Tensile extension at Maximum Load (mm) | Extension at Break (Standard) (mm) | Comment |
|-------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|---|
| | 1 kahe poldiga kinnitus | 31,3 | 25,3 | 33,3 | 34,7 | |
| | 2 ühe poldiga | 13,0 | 13,0 | 11,8 | 11,9 | Eelmisest katsest oli eelpraegu poldi lähedal |
| | 3 ühe poldiga teine katseplaat | 17,1 | 17,1 | 22,1 | 22,2 | |
| | 4 kahe poldiga | 23,2 | 23,2 | 26,1 | 26,3 | |
| Me an | | 21,1 | 19,6 | 23,3 | 23,8 | |

Sele 3.17. Teise lahenduse kinnitusankrute katsetused (1. ja 2. Al ning 3. ja 4. süsinikankur).

Paraku antud katsed ebaõnnestusid. Peamiseks põhjuseks, miks katse ebaõnnestus, oli rakis, mis kinnitusankru tõmbamise käigus hakkas liialt deformeeruma, mille tõttu katsekehad purunesid. Rakise purunemise tõttu ei tulnud katsest välja ka vahe alumiinium- ning süsinikankru vahel.

Hinnates vajaminevate kinnitusankrute kogust vormelautole ning süsinikkanga oluliselt kõrgemat hinda võrreldes alumiiniumiga, otsustati, et edasi keskendutakse ainult alumiiniumankru arendusele. Süsinikankrutele kuluks materjali umbes 13 m^2 ning kokku kuluks süsinikku 6 kg. CES Edupack tarkvara järgi on 60% kiufraktsiooniga süsiniku kg hind 202 eurot [25] ehk kokku kuluks puhtalt kinnitusankrute peale 1212 eurot. Valmistatav plaat peab olema aga suurem, kuna vesilõikuse jaoks peavad detailide vahele ka väiksed vahed jääma ning materjali lõikamisel tekib jääke. Alumiiniumit kulub $0,4 \text{ m}^2$, mis kaalub kokku 10 kg. CES Edupacki järgi maksab alumiinium 6082 T6 kg 1,53 eurot [25], mis teeb kinnitusankrute koguhinnaks 16,5 eurot, mida on ligi 100 korda vähem kui süsiniku korral. Süsinikust valmistatud ankrud on küll kergemad, kuid kui pöörata rõhku geomeetria optimeerimisele, oleks võimalik ka alumiiniumist valmistada väga kergeid kinnitusankruid ning seetõttu 100 kordne materjali hinnavahe ei ole õigustatud. Järgnevas kinnitusankru arenduses pööratakse rõhku alumiiniumankru arendusele.



Sele 3.18. Purunenud süsinikankruga katsekeha

Hinnates katsekeha purunemist, on sele-lt 3.18 näha, et purunemine on toimunud survekoormuste tõttu. Laminaadi alumisel pinnal on näha nii 45° all asetsevad nihkepragused kui ka 0° all asuvat survepragu. Suure tõenäosusega katse ebaõnnestus, kuna katserakis paindus läbi, mille tõttu fataalne purunemine toimus 0° nurga all.

3.2.3. Järeldused

Kuigi teise lahenduse katsetustest õnnestus ainult 1. katse, saab sellest siiski mitmeid järeldusi teha:

- Vaiguga liimitud kinnitusankur püsib vahu ning materjalikihtide küljes paremini kui West Systems-i täidismaterjaliga.
- Kausikujuliselt faasitud vaht jaotab pinged laminaati paremini laiali ning kinnitusankrut ei tõmmata laminaadist välja.
- Vahu geomeetria muutmine tõstis esimese purunemise tugevuspiiri 15 kN juurde.
- LEM ning katse tulemused erinevad endiselt vähemalt 2x.
- Süsiniku ning alumiiniumi suure hinnavahe tõttu eelistatakse alumiiniumi.

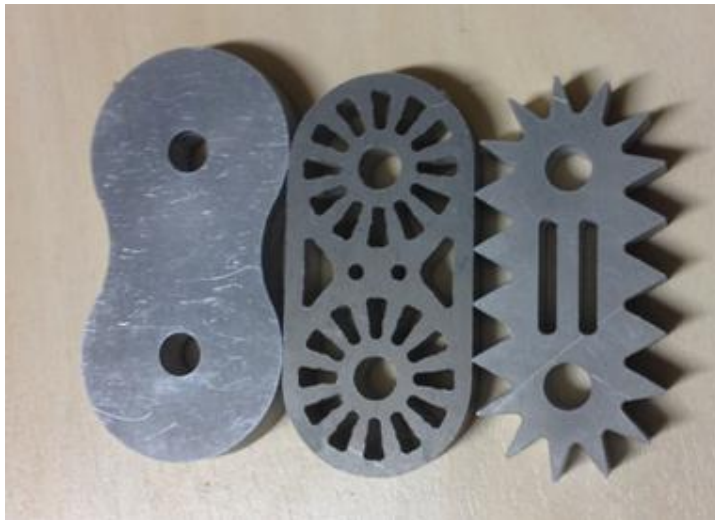
3.3 Kolmas lahendus

3.3.1. LEM

Analüüside ning katsetuste tulemusena otsustati, et edasi liigutakse alumiiniumist ankrulahendusega ning kausikujuliselt faasitud vahuga. Antud geomeetriaga täidismaterjal võimaldab laminaadis paremini pingeid laiali jaotada. Kinnitusankru disainimise juures on oluline saavutada võimalikult suur vahu ning ankru vaheline kontaktpindala, mis parema jõu ülekande ankrust laminaati. Võimalikke variante kontaktpinna suurendamiseks on mitu. Üks võimalus on kasutada ankrut, mille paksus on sama, mis vahul. Antud lahenduse miinuseks on suur kaal ning antud juhul ei tööta materjalikihid ühtlaselt vaid peamiselt Z-telje sihis, mis on materjali tugevusomadustelt kõige nõrgem. Teine variant on ankru välispindala suurendada selle sakiliseks muutmiseks, mis võimaldab saavutada suuremat liimipindala võrreldes ovaalse geomeetriaga kinnitusankruga. Juhul kui valmistada ankur 10 mm paksune, siis kausikujuliselt faasitud vahuga on võimalik tekitada laminaati ka jäikusribi ning kinnituspunkt on jäigem. Kolmas variant on valmistada tähekujueline kinnitusankur, mille paksus on 25 mm, kuid antud lahendus on raske. Järgnevalt on välja toodud tabel, kus on kirjas kinnitusankrute kontaktpindala suurus ning detailide kaal.

Tabel 3.3. Erinevate kinnitusankru geomeetriaate võrdlus

| Nimi | Nihkepindala,mm ² | Mass, g | (mm ² /g) |
|-----------------------------|------------------------------|---------|----------------------|
| Tähtankur, 10mm | 3190 | 30 | 106 |
| Tähtankur, 25mm | 7975 | 75 | 106 |
| Ovaal, 10mm | 2048 | 67 | 30 |
| Ovaal, 25mm | 5107 | 169 | 30 |
| Optimeeritud ovaal, 10mm | 1859 | 42 | 44 |
| Optimeeritud ovaal, 25mm | 4638 | 103 | 44 |



Sele 36.19. Ovaal, optimeeritud ovaal ning tähekujuline kinnitusankur

Tabelist 3.3 on näha, et kõige suuremat nihkepindala 10 mm paksuste ankrute seas pakub tähekujuline kinnitusankur, mis on 41 % suurem nihkepinnaga kui ovaalne ankur. Hinnates kinnitusankru massi ning kasuliku nihkepindala vahelist seost, võib näha, et tähekujuline kinnituspunkt on 140 % parema kasuliku pinna ja massi suhtega kui teisel kohal asuv optimeeritud ovaalne ankur ning seetõttu pühendatakse järgnevas arendustöös tähtankru arendusele, kuna tegemist on kõige parema nihkepindala ja kaalu suhtega lahendusega.

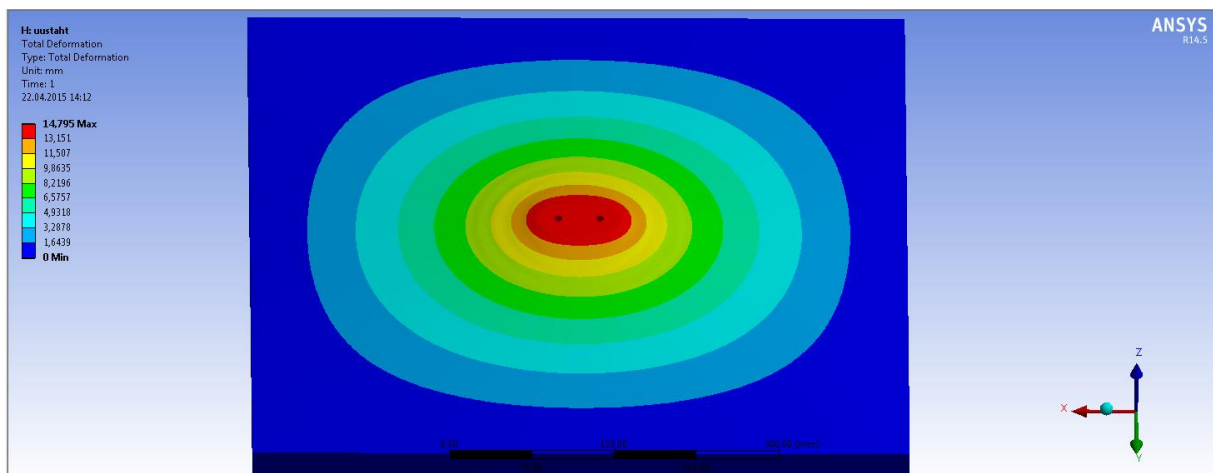
Tähtankru eeliseks võrreldes tavalise ümmarguse või ovaalse ankruga on detaili erinev jäikus erinevates tähe asukohtades, mis tagab sujuvama elastsusmoodulite ülemineku. Järgnevas tabelis on välja toodud alumiinium 6082 T6 ning tvilli elastsusmoodulid.

Tabel 3.4. Al 6082 T6 ning tvilli elastsusmoodulite võrdlus [19]

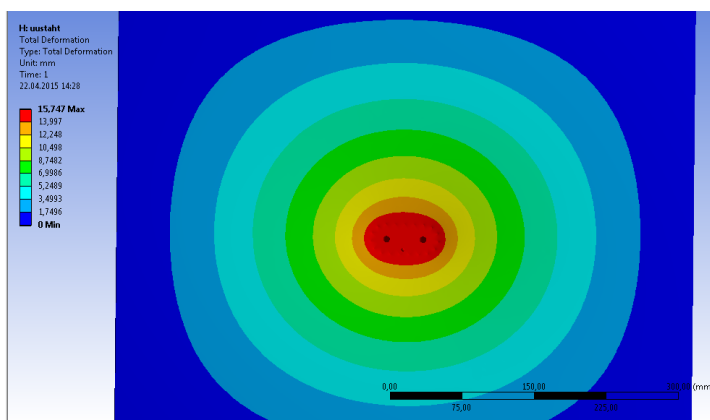
| Nimetus | Elastsusmoodul |
|-------------|----------------|
| Al 6082 T6 | 70 GPa |
| Tvill 0/90 | 48 GPa |
| Tvill-45/45 | 17 GPa |

Suur elastsusmoodulite erinevus on ka põhjuseks, miks laminaat puruneb kinnitusankru ning vahu kontaktpinnalt. Tähekujulise ankru jäikus väheneb seda enam, mida suurem on distants kinnitusankru poldiavast.

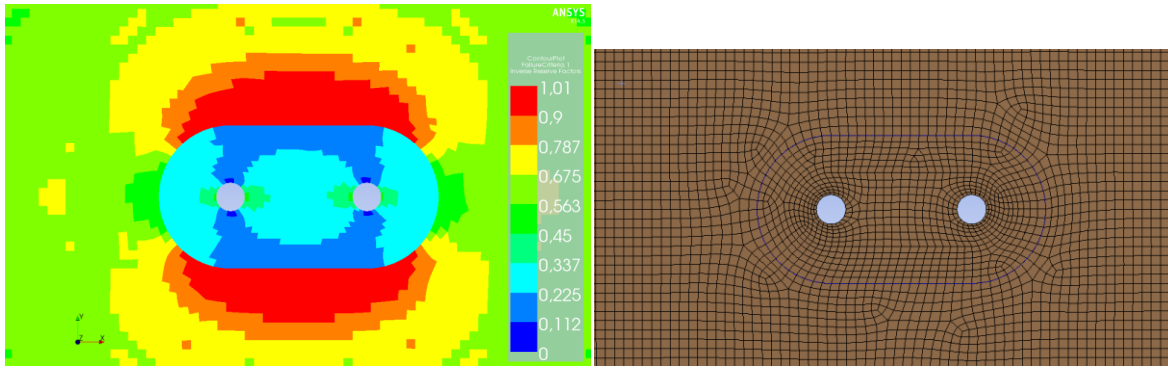
Järgnevalt on välja toodud tugevusanalüüs tähtankru ning ovaalse kinnitusankru kohta. Analüüside deformatsioonid ning purunemiskriteeriumid on samas suurusjärgus reaalsete katsetega.



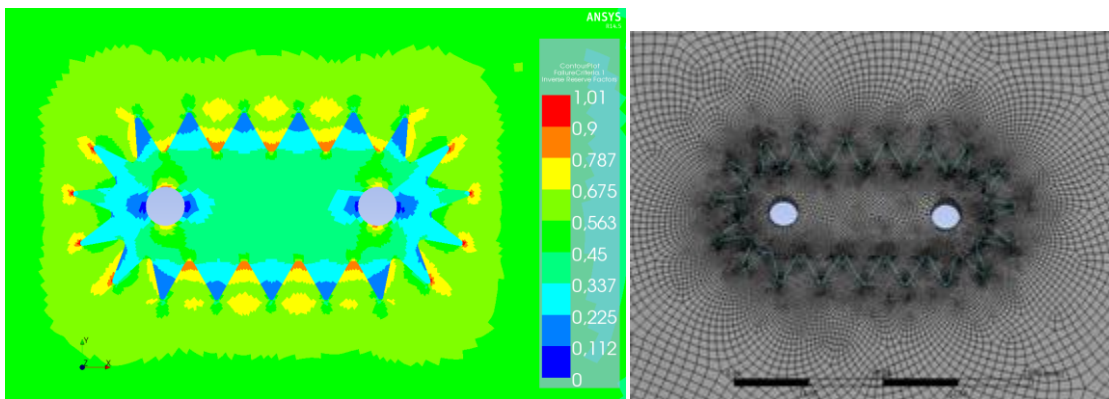
Sele 3.20. Ovaalse ankrude deformatsioon



Sele 3.21. Tähtankru deformatsioon

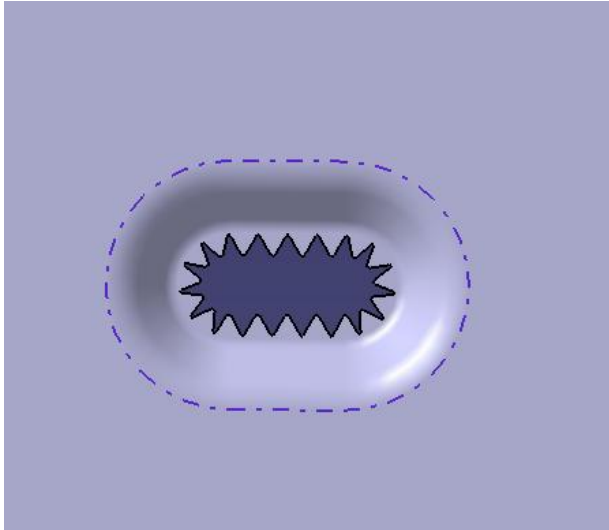


Sele 3.22. Ovaalse inserdi tugevusanalüüs ning võrgustiku tihedus (58 094 elementi)



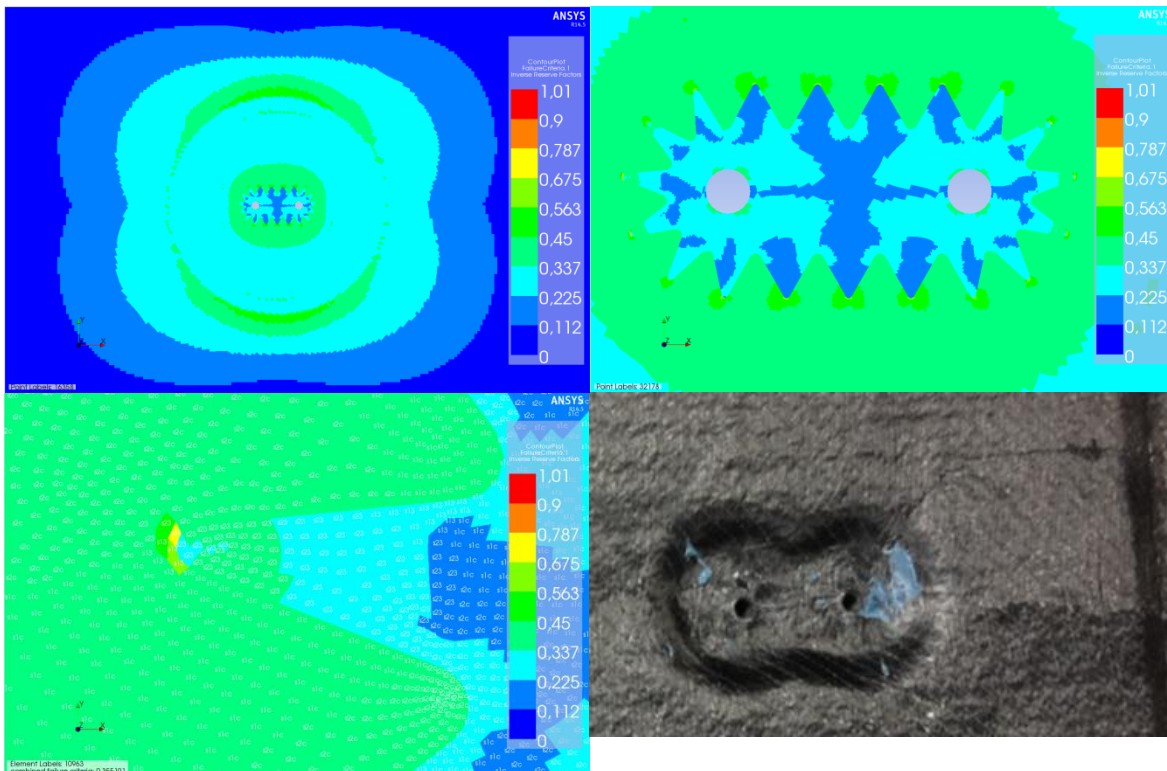
Sele 3.23. Tähtankru tugevusanalüüs ning võrgustiku tihedus (76810 elementi)

Kahe ankrutüübi võrdlusest võib välja lugeda kahte põhilist omadust. Ovaalse kuju korral on laminaat jäigem, kuna kinnitusankur ei paindu läbi. Tähe kuju korral on läbipaine 6% suurem, kuid vaadates tugevusanalüüsi piltidelt pöördvarutegureid, siis tekkivad pinged on oluliselt madalamad, jäädes alla 0,9 ehk laminaat peab nendele koormustele vastu. Mõlemad analüüsid on läbi viidud täpselt samasuguse kihtide asetusega. Lõplikuks valikuks osutus tähekujuline kinnitusankur, mis on ümbritsetud faasitud vahuga. Järgneval sele 3.24 on välja toodud tähekujulise kinnitusankru vahu geomeetria. Vaht on faasitud kausi kujuliselt ning vahu sisse on lõigatud kinnitusankru kuju.



Sele 3.24. Tähekujulise kinnitusankru vahu kuju

Sele 3.25 on välja toodud näide, kuidas Ansys-i ACP programmi abil on võimalik hinnata laminaadi purunemiskriteeriume.



Sele 3.25. Laminaadi purunemise hindamine reaalses elus ning Ansys-i ACP programmis.

Sele 3.25 peal on näha analoogsete laminaatide omavahelist võrdlust. Tugevusarvutuse keskkonnas võib näha, et suurimad pinged tekivad laminaadis kinnitusankru otstesse, kust toimub ka purunemine. All vasakul oleval pildil on kuvatud ka purunemiskriteeriumid.

Suurimaks pöördvaruteguriks laminaadis on 0,787 ning antud olukorras on tegemist purunemisega S_{23} , mis tähendab normaalsihilist nihkepinget 90° ning normaalsihilise suunavektori vahel ehk YZ tasapinnas purunemist. Purunemine toimub laminaadis liigse nihkepinge tõttu [17].

3.3.2. Katsetamine ning valmistamine

Peale LEM-arvutuste teostamist valmistati katsekehad. Kasutati kausikujuliselt faasitud vahtu ning tähekujulist kinnitusankrut. Valmistati kokku kaks erinevat katsekeha ning võrreldi ka erinevaid tugevduslappi. Üldine kihtide asend oli laminaatidel järgmine: tvill, biaktsiaal, uniaktsiaal, biaktsiaal, 25 mm paksune vaht, biaktsiaal, uniaktsiaal, biaktsiaal. Kangaste kaal ilma tugevduslappideta oli 243,8 g. Vahu mõõduks oli 300 mm x 300 mm ning kaaluks 123,1 g.

Järgnevas tabelis on välja toodud laminaatides kasutatavate tugevduslappide suurused ning nende kaalud.

Tabel 3.5. Laminaatide omavaheline võrdlus

| Lapi mõõt, mm | Lapi kiu nurk, kraadi | Kergem laminaat | Raskem laminaat | Lapi kaal, g |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Väline laminaadi kiht | | | | |
| 160x170 | 45 | | x | 17,4 |
| 150x120 | 90 | x | x | 11,5 |
| Sisemine laminaadi kiht | | | | |
| 150x110 | 90 | x | x | 10,6 |
| 140x140 | 90 | x | x | 12,5 |
| 120x150 | 45 | | x | 11,5 |
| 170x160 | 45 | | x | 17,4 |

Tabelis 3.5 on välja toodud kaks erinevat laminaati. Kergem ning raskem laminaat. X-täht tähendab lapi olemasolu laminaadis. Analüüsitulemustest on näha, et kauss-kinnitusankru korral töötab rohkem laminaadi sisemine kiht ning kuna kauss moodustab laminaati ka jäikusribi, siis on sisse poole suurema hulga materjalikihtide asetused õigustatud.

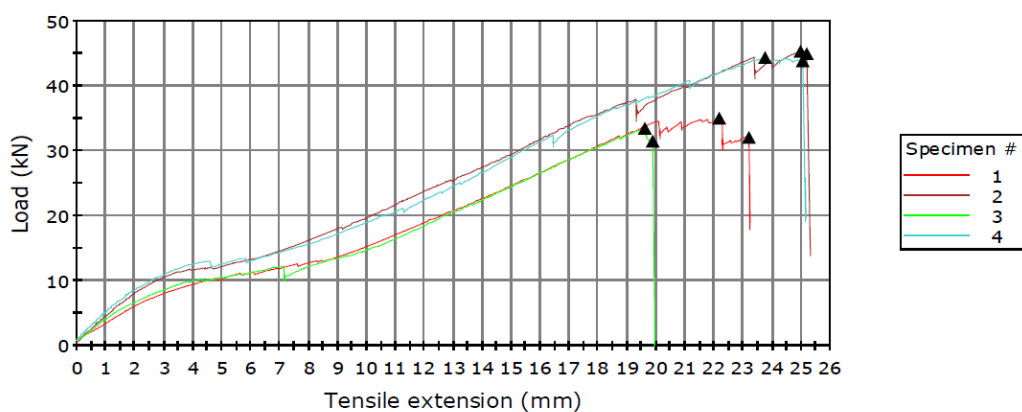


Sele 3.26. Kausikujulise vahu ning tähekujulise ankru lahendus enne lamineerimist.

Peale lamineerimist oli kergema laminaadi kaal 646,1 g ning raskema kaal 696,4 g. Katsekehad läbisid ka järelkõvendamise tsükli ahjus. Katsedetaile kuumutati 80 °C juures 8 h, et parandada vaigu mehaanilisi omadusi ning seeläbi tõsta laminaadi üldist tugevust.

Seejärel viidi läbi antud laminaatide tõmbekatsed välja selgitamiseks katsekehade tugevust. Tabel 3.3 välja toodud võrdluses oli küll välja toodud tähekujulise kinnituspunkti eelised ovaalse ees, kuid kolmanda lahenduse korral otsustati katsetada, kuidas mõjutavad tõmbeteimi tulemusi erinevad tugevduslappide hulgad. Seetõttu otsustati lamineerida ka ovaalse kinnitusankruga katsekehad, et võrrelda tähekujulist ja ovaalset lahendust.

Specimen 1 to 4



| | Specimen label | Maximum Load (kN) | Load at Break (Standard) (kN) | Tensile extension at Maximum Load (mm) | Extension at Break (Standard) (mm) | Comment |
|------|----------------|-------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|---------|
| 1 | TÄHT 1 | 35,1 | 32,1 | 22,1 | 23,3 | |
| 2 | TÄHT 2 | 45,3 | 45,0 | 25,0 | 25,2 | |
| 3 | O-1 | 33,5 | 31,5 | 19,6 | 19,9 | |
| 4 | O-2 | 44,4 | 43,8 | 23,7 | 25,1 | |
| Mean | | 39,5 | 38,1 | 22,6 | 23,4 | |

Sele 3.27. Kolmanda katsegrupi katsekehade tõmbegraafik

Täht-1 ning O-1 korral on tegemist kergema laminaadiga, Täht-2 ning O-2 korral aga raskemaga.



Sele 3.28. Kolmanda grupi katsekeha purunemine

Purunemispildi järgi on näha, et laminaadis toimus purunemine tõmbe poole peal ning pragu levib 45° nurga all, mis tähendab nihkepurunemist.

3.3.3. Järeldused

Hinnates laminaatide tõmbegraafikuid, on võimalik teha mitmeid olulisi järeldusi:

- Ovaalse kinnitusankru korral toimub esimene kiu purunemine, mis tekitab suure languse koormusgraafikul, võrdlemisi vara. Nõrgema laminaadi korral umbes 11 kN juures ning tugevama korral 13 kN juures. Hinnates täht-ankru graafikut, sellist langust ei näe, mis tähendab, et jõud ankrust laminaati jaotuvad ühtlasemalt ning selget purunemist ei toimu. Küll toimub samas piirkonnas, kus ovaalse ankruga laminaadi korral toimub purunemine, teatav koormusgraafiku tõusu langus, kuid kiu purunemisi märgata ei ole.
- Hinnates graafikute käitumist koormuse tõusul, siis tähekujulise ankruga graafik on sujuvam kui ovaalse oma. See näitab paremat jõudude jaotust laminaadis.
- Ankrute tugevus analoogsete materjalikihtide korral on samas suurusjärgus, kuid tähekujulise lahenduse koormusetaluvus on 1,9%-2,7% suurem.

Komposiidianalüüsi järgi laminaadi välises kihis tekkivad pinged on võrreldes sisemise kihiga väiksemad mistõttu kasutati välimises kihis ka vähem tugevduslappi. Katsekehasid vaadates selgus, et olukord ei vasta tugevusanalüüsile ja sama tugevduslappide konfiguratsiooni tuleb kasutada ka välimises kihis.

Lisaks on katsetustest võimalik järeldada, et 46 g kanga lisamine muudab kinnitusankru koormustaluvust 10 kN võrra suuremaks. Maksimaalne laminaadi tugevus on 45 kN, mida on ligi poole rohkem kui reeglid nõuavad. Järgnevas arendustöös tuleb keskenduda kergema laminaadi saavutamisele ning kuna antud hetkeks oli selgunud monokoki kihtide paigutus, tuli ankrute materjalikihtide valikul sellest lähtuda.

3.3.4. Katsekehade purunemise uurimine

Kolmanda katsegrupi tõmbekatsed näitasid, et kinnitusankrute arendus liigub õiges suunas. Tähtankur töötab ning vahu kausjas kuju tagab selle, et pinged jaotuksid laminaati ühtlaselt. Pingekonsentraatoreid kinnitusankru ja vahu kontaktpinnale ei teki. Kõik valmistatud katsekehad freesiti kinnitusankru koha pealt pooleks, et kindlaks teha südamikku seisukord ning ankrute ja vahu omavahelise ühenduse tugevus. Esimese lahenduse korral oli ankur liimitud vahu külge West Systems-i täidismaterjaliga, mida tutvustati lõputöö esimeses pooles peatüki 3.1, "Esimene lahendus", all. Kõikide ülejäänud katsekehade korral on kasutatud ankrut liimimiseks West Systems-i epovaiku.

Esmalt freesiti pooleks esimese lahenduse katsekehad, kus ankur oli liimitud täidismaterjaliga. Freesimise käigus tuli ankur vahu küljest lahti ning hakkas freesi lõhkuma, mille tõttu võib järeldada, et täidismaterjal ei hoida kinnitusankrut piisavalt korralikult kinni, kuna ka tõmbekatsel oli näha, et ühendus kinnitusankru ja vahu vahel on nõrk.

Järgnevalt freesiti pooleks infusioonivahuga valmistatud teise lahenduse katsekeha. Freesimise käigus probleeme polnud ning ankur oli vahu küljes kinni.



Sele 3.29. 19 mm paksuse vahuga laminaadi lõikepind.

Lõikepinnast on näha, et vaigu ning vahu vahelise ühenduspinnaga probleeme pole. Epovaik hoiab kinnitusankrut kinni. On näha, et laminaat on katastroofiliselt purunenud nihkepingete tõttu, mis tekkisid vahtu 45° suuna alla normaalsihilise tõmbamise suhtes. Lisaks on pealne materjalikiht vahu küljest lahti tulnud. Antud katsekeha on valmistatud enne seda, kui oli teada monokokk-kere materjalikihtide hulk ning seetõttu on kasutatud ka 19 mm paksust vahtu. Kolmanda lahenduse katsekeha on valmistatud 25 mm paksusest lahtise klotsiga vahust, kuna vahepeelsel ajal oli selgunud monokokk-kere vahu paksus.

Järgneval sele 3.30-l on välja toodud kolmanda lahenduse katsekehade ristlõigete pildid.



Sele 3.30. Kolmanda grupi katsekehade lõikepind.

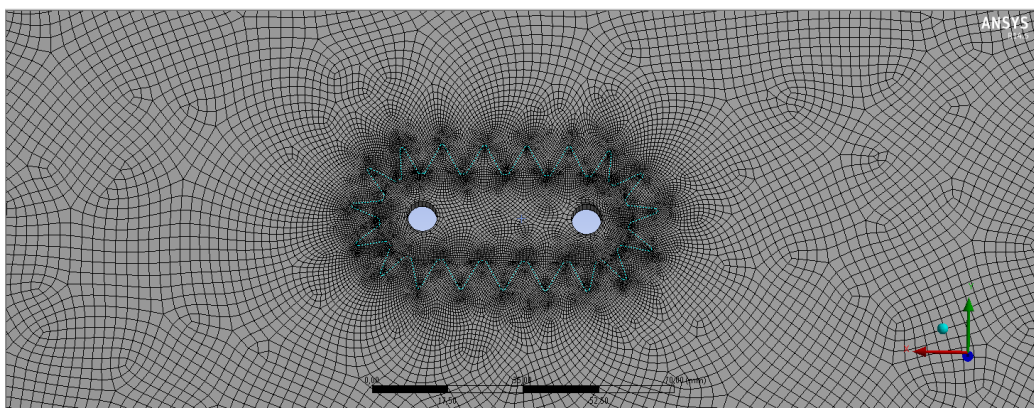
Antud katsekehad on valmistatud märglamineerimise teel ning kasutati lahtise klotsiga vahtu. Sealt 3.30 võib näha, et tähtankru korral on laminaadikihid kinnitusankru küljes paremini kinni. Kinnitusankru ümbruskonnas on näha nihkepragusid, kuid tegemist ei ole fataalset purunemist põhjustava defektiga. On näha, et lahtise vahu sooned on jäänud kuivaks ning tegemist on laminaadi purunemise peamiste põhjustajatega (eelkõige vasakus ja paremas servas asuvad praod).

3.4 Neljas lahendus

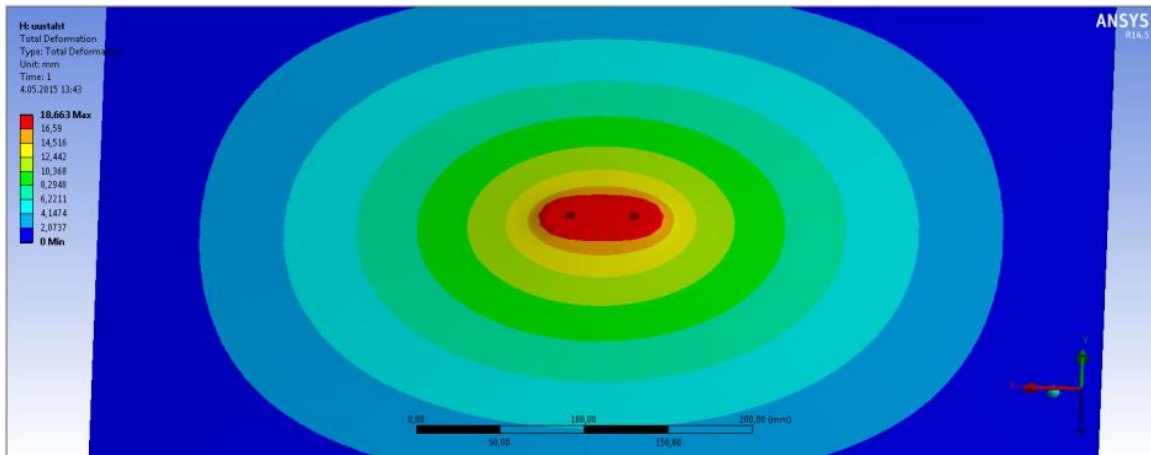
3.4.1. LEM

4. lahenduse korral on eesmärgiks muuta muuta laminaat kergemaks, kuid samal ajal tagada süsteemi vastupanu 30 kN suurusele jõule ning kinnitusankru eluiga peab olema samuti piisavalt pikk, et see võistlustel ei puruneks. Monokokk-kere üldisteks kihtideks on tvill, uniaktsiaal, twill, mis on ühtlasi kergem kui esimestel katsetustel kasutatud materjalikihtide paigutus ning lisaks ka nõrgem. Tvilli pindtihedus m^2 kohta on 200 g ning biaktsiaali pindtihedustihedus on $300 g/m^2$, mis terve monokokk-kere peale tekitab 2400 g suuruse massierinevuse. Nõrgema laminaadi tõttu tuleb suuremat tähelepanu pöörata tugevduslappide õige materjali ning kiudude suuna määramisele.

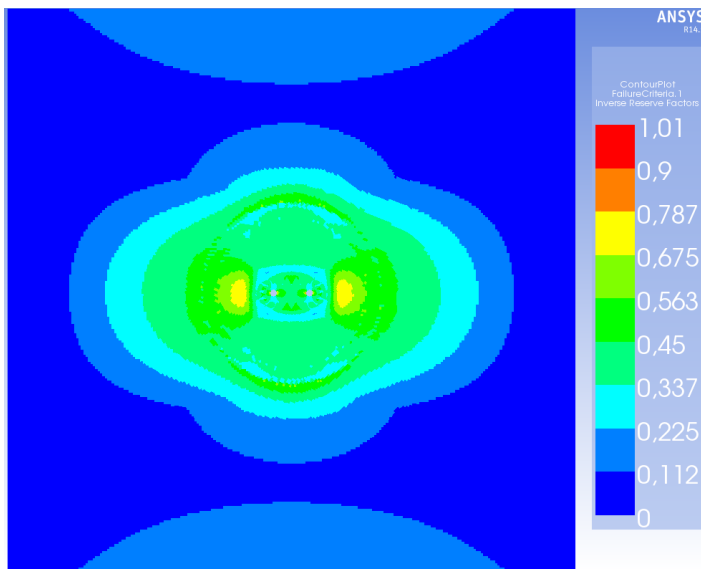
Järgnevatel seledel on välja toodud parimaks osutunud materjalikihtide asetus. Minimaalseks elemendi suuruseks oli 0,5 mm.



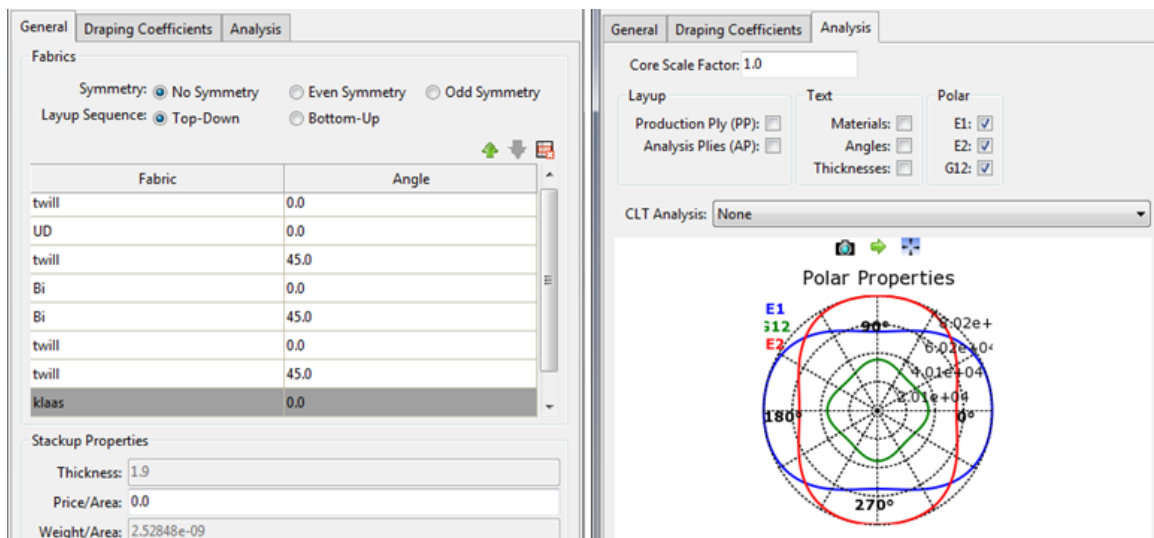
Sele 3.31. Võrgustiku tihedus LEM-arvutuste teostamisel (78654 elementi)



Sele 3.32. Tähekujulise kinnitusankru deformatsioon



Sele 3.33. ACP tugevusanalüüsi tulemus



Sele 3.34. Materjalikihtide asetuse ning laminaadi nihke- ning elastsusmoodulid

Selekt 3.33 on näha, et laminaat peab 30 kN suurusele koormusele vastu. Maksimaalne deformatsioon on sele 3.32 põhjal 18,6 mm ning maksimaalne pöördvarutegur on 0,787. Sele 3.34 toob välja laminaadis kasutusel olevad kihid ning laminaadi nihke- ning elastsusmoodulid. Tugevduslappide mõõdud alates klaasriidest on järgmised: 150 mm x 150 mm, Ø 100 mm, Ø 130 mm, Ø 160 mm, Ø 190 mm. 30 mm üleminekud tugevduslappide vahel sai valitud nii LEM-arvutuste kui ka reaalse katsetuste põhjal. Juhul, kui lappide üleminekudistants on väiksem kui 30 mm, tekkisid üleminekukohtadesse praod ning laminaat purunes varem kui 30 mm üleminekute korral.

3.4.2. Katsetamine ning valmistamine

Katsekehad valmistati järgneva kihtide asetusega:

Tabel 3.6. Kangaste asetuse 4.lahenduse katsekehades

| Kanga nimi | Nurk,° | Tugevduslapid | Nurk,° | Mõõt, mm | Mass,g |
|----------------------|--------|---------------|--------|----------|--------|
| Välimine kiht | | | | | |
| Tvill | 0 | Biaksiaal | 0 | Ø 190 | 18,4 |
| Uniaksiaal | 0 | Biaksiaal | 45 | Ø 160 | 13,1 |
| Tvill | 45 | Tvill | 0 | Ø 130 | 4,3 |
| | | Tvill | 45 | Ø 100 | 2,5 |
| | | Klaas | 0 | 150x150 | 3,4 |
| Sisemine kiht | | | | | |
| Tvill | 45 | Klaas | 0 | 150x150 | 3,4 |
| Uniaksiaal | 0 | Twill | 45 | Ø 100 | 2,5 |
| Tvill | 0 | Twill | 0 | Ø 130 | 4,3 |
| | | Biaksiaal | 45 | Ø 160 | 13,1 |
| | | Biaksiaal | 0 | Ø 190 | 18,4 |

Eelmiste katsekehade võrreldes on näha, et üldine kihtide hulk on jäänud väiksemaks, kuid tugevduslappide hulk on suurenenud. Võrreldes aga tugevduslappide massi, siis tugevduslappide mass on neljanda lahenduse puhul madalam. 3. lahenduse katsekehal oli tugevduslappide massiks 52 g ning 4. lahenduse omal on see aga 41,7 g. Lisaks on muudetud ka kangatüüpe. Eelnevalt kasutati ainult biaksiaali kangaid, kuid nende nihketugevus on

madal. Kohe kinnitusankru vastas kasutati klaasiriidet, mis takistab alumiiniumankru ning süsinikkomposiitmaterjali omavahelist oksüdeerumist, millest täpsemalt oli juttu peatüki 1.3.1, "Laminaadi korrosioon", all. Peale klaasriiet tuleb tvilli kiht, mis on hea nihketugevusega. Viimasena kasutatakse tugevat biaksaali kangast. Kanga nurgad on korda mööda 0° ja 45°, mille tõttu paraneb laminaadi vastupanu nihkepingetele.

Peale laminaadi infusioonimist selgus, et detail kaalub 923 g, mis on liiga raske, kuna eelmised märjalt tehtud katsekehad kaalusid ligi 700 g. Raske laminaadi põhjus on lahtise klotsiga vaht. Laminaatide pooleks freesimisel võis näha, et lahtise klotsiga vahu sooned olid vaigust tühjad ning tegemist oli põhilise pragude alguse asukohaga. Infusioonimisel täitusid kõik need sooned vaiguga ning tagajärjeks oligi raske laminaat. Seejärel võeti vastu otsus, et monokokk-kere peal lahtise klotsiga vahtu ei kasutata ning telliti infusioonivaht, mis freesitud laminaadi ristlõiget hinnates töötas kõige paremini.

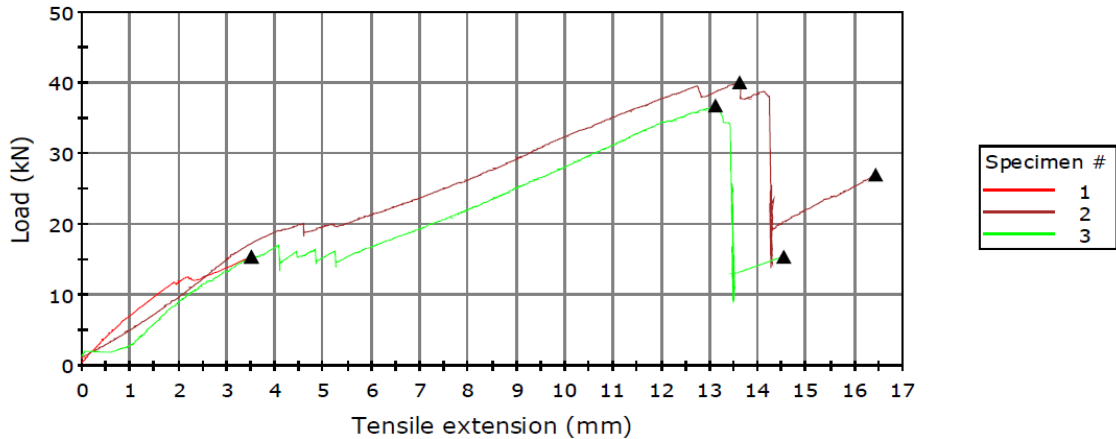
Tõmbekatses kasutati seibide asemel ühte suurt tugevdusseibi, mis peab tagama jõu parema jaotuse laminaadis. Tugevdusseibid on ka reeglitega ette nähtud ning konstrueeriti spetsiaalne seib, mis ühendab mõlemat poldipead. Järgneval pildil on näha tugevdusseibi:



Sele 3.35. Tugevdusseib.

Neljanda lahenduse katsekehade tõmbegraafik on järgmine:

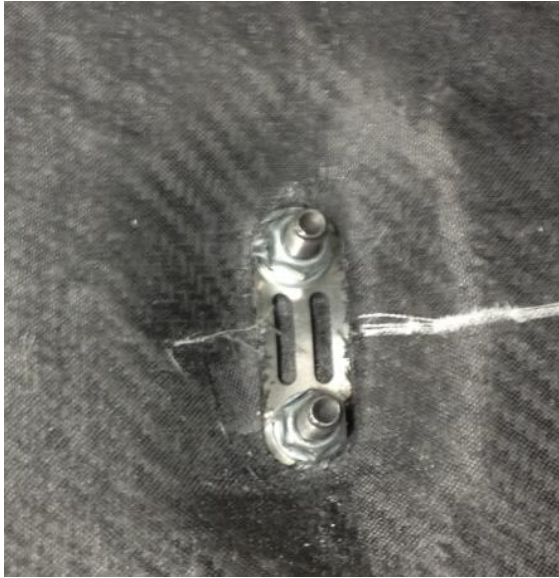
Specimen 1 to 3



| Specimen label | Maximum Load (kN) | Load at Break (Standard) (kN) | Tensile extension at Maximum Load (mm) | Extension at Break (Standard) (mm) | Comment | Energy at Break (Standard) (J) | Energy at Tensile Strength (J) |
|----------------|-------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|---------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 15,5 | 15,5 | 3,5 | 4,6 | | 24,1 | 34,1 |
| 2 | 40,1 | 27,0 | 13,6 | 16,5 | | 393,8 | 309,2 |
| 3 | 36,8 | 15,5 | 13,1 | 14,6 | | 284,9 | 243,1 |
| Mean | 30,8 | 19,4 | 10,1 | 11,9 | | 237,6 | 195,5 |

Sele 3.36. Neljanda lahenduse laminaadi mehaanilised katsetused.

Sele 3.36 graafikul on näha 3 joont. Katsekeha 1 ja 2 on samad detailid. 1. tõmbe korral tekkis Instroni tõmbepingis arusaamatu probleem ning pink seiskus. Seejärel tõmmati sama katsekeha uuesti. 1.katsekeha kihtide paigutus on sama, mis 3. lahenduse korral. Ainsaks erinevuseks võrreldes 3. lahendusega oli see, et katsekeha infusiooniti. Katsekeha nr. 3 kihtide paigutus on välja toodud tabelis 3.6. Mõlemal juhul oli kasutusel kahe poldiavaga tähtankur. Tugevama katsekeha puhul on näha esimest purunemist 20 kN juures, mis tähendab ligikaudu kolme kordset varutegurit arvestades vedrustusest üle kanduvaid jõudusid. Katsekeha pidas vastu 40 kN suurusele koormusele. Joon nr. 3 on 4. lahenduse katsekeha. Katse alguses aset leidev horisontaalne platoo on põhjustatud pingi valesti seadistatud eeljõust. Graafikult on näha, et laminaadi purunemine algab 17 kN juurest ning maksimaalne koormus, mida laminaat talub, on 36 kN. Järgnevalt on välja toodud pilt katselaminaadi purunemiskohast:

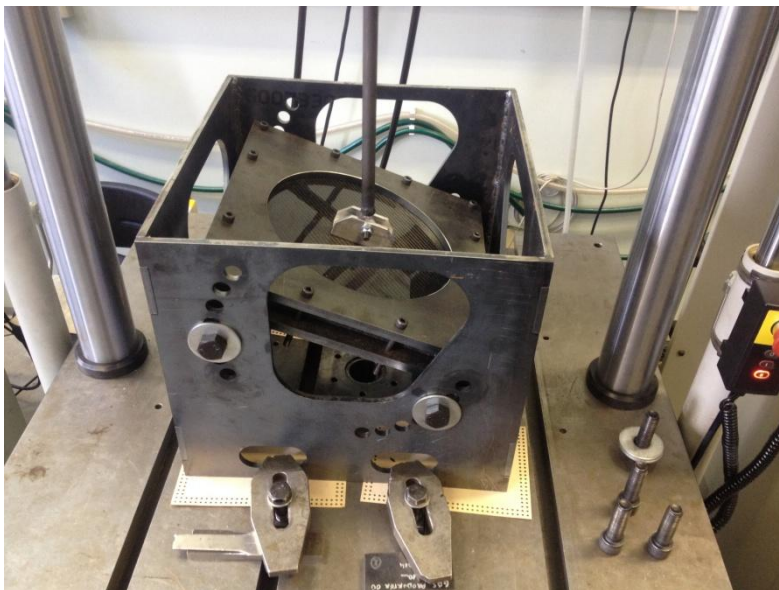


Sele 3.37. Neljanda grupi katselaminaadi purunemine

Laminaati analüüsidest jälgi pragudest ega möradest ei olnud. Purunemine on toimunud tugevdusseibi juurest ning graafikut hinnates algas see umbes 17 kN juures

3.4.3. Väsimuskatsetus

Väsimuskatse meetodikast on täpsemalt kirjas peatüki 2.4, "Väsimuskatse meetoodika", all.



Sele 3.38. Väsimuskatse rakistus.

Esmalt lasti pingil teostada 50 000 tsükli. Koos algseadistamisega viidi läbi 53 274 tsükliline väsimustest. Antud katse käigus seadistati pink jõu meetodi peale, mis tähendab, et pink rakendab iga tsükli jooksul katsekehale 5 kN suuruse tõmbe- ning survejõu ning salvestatakse andmeid katsekeha deformatsiooni kohta. Pink jääb seisma, kui katsekeha deformeerub etteantud normist rohkem. 53 274 tsükli jooksul katsekeha ei purunenud. Maksimaalseks deformatsiooniks laminaadis survejõu korral oli 0,899 mm ning tõmbejõu korral 1,06 mm ning see esines katsetsükli lõpus. Katse alguses olid deformatsioonid vastavalt 0,899 mm ja 0,907 mm. Antud katsest võib järeldada, et 5 kN suurune koormus ei põhjusta 53 274 tsükli möödudes laminaadi nõrgenemist survekoormustele. Vastupanu tõmbekoormustele nõrgeneb ligi 18 %.

Juhul kui vormelautole mõjuvad ringi jooksul maksimaalsed koormused 4 korda, siis oleks võimalik Rapla kardirajal üles seatud koonuste vahelisel rajal sõita 17 758 ringi. Juhul, kui arvestada olukorda, et iga rajal mõjuv jõud on 5 kN suurune surve- või tõmbejõud, mis tegelikult reaalne pole, saaks rajal sõita 1401 ringi. Rapla ringi pikkuseks on 1035 m [16] ning seega saaks sõita realsel juhul 18 379 km ning halvimal juhul 1450 km. FEST15 on ette nähtud vastu pidama ühe hooaja ning ühe hooaja kilometraaz on umbes 500 km. Seega antud koormustega peab kinnitusankru lahendus vastu ning varutegur on piisav.

Katsekeha mittepurunemisele 5 kN suurusele sinusoidaalse 53 274 tsüklilise koormuse tõttu otsustati katset jätkata. Laminaadile rakendati sinusoidaalne koormus ning maksimaalseks tõmbe- ja survekoormuseks valiti 10 kN. Katsekehale teostati 2036 tsükli ning seejärel otsustati katse lõpetada, kuna laminaadi jäikus vähenes ning pingi eluea huvides otsustati katse lõpetada. Võttes hüpoteesiks 4 maksimaalset koormust ringi kohta, siis laminaat pidas vastu 678 ringi ning kui iga jõud oleks maksimaalne, siis katse jooksul pidas laminaat vastu 54 ringi ehk realsel juhul pidas laminaat vastu 701 km ning halvimal juhul 55 km. Katse lõpus oli suurimaks tõmbedeformatsiooniks 4,2 mm ning survedeformatsiooniks 2,6 mm. Võrreldes katsekeha tulemusi väsimustsükli lõpus eelnevalt välja toodud tõmbekatse diagrammiga, võib näha, et ilma väsimuskatset teostamata oli 10 kN juures katsekeha deformatsioon umbes 2,25 mm. Pärast 53 274 tsüklilist 5 kN suurust ning 2036 tsüklilist 10 kN suurust sinusoidaalset koormust oli katsekeha deformatsioon tõmbel 4,2 mm ehk katsekeha deformatsioon suurenes 86%.



Sele 3.39. Neljanda lahenduse katsekeha pärast väsimuskatset.

Hinnates katsekeha seisukorda peale väsimuskatset, siis seda võib pidada heaks. Katsekeha ei purunenud täielikult ning oli võimeline veel koormust taluma. Pealmise kihi poolel, kus asus kinnituskõrv, on näha kriibitud pinda. Praod puuduvad. Sisemisel materjalikihil on kahjustusi rohkem. Tugevdusplaadi serv on katki hõõrunud sisemise materjalikihi. Tõmbekatsel esinevaid maksimaalseid deformatsioone vaadates jääb silma, et katsekehal esinevad tõmbedeformatsioonid on suuremad kui survedeformatsioonid. See on tingitud eelkõige erinevast tugevdusseibi ja kinnituskõrva kontaktpindalast laminaadiga. Kõrva kontaktpindala on suurem kui tugevdusseibil, mille tõttu jõud jaotatakse suuremale alale laiali ning laminaadis esinev deformatsioon on väiksem. Seega võib 4. lahenduse eluiga lugeda piisavaks ning kasutada antud kinnitusankru geomeetriat ning materjalikihtide asetust FEST15 monokokis.

3.4.4. Järeldused

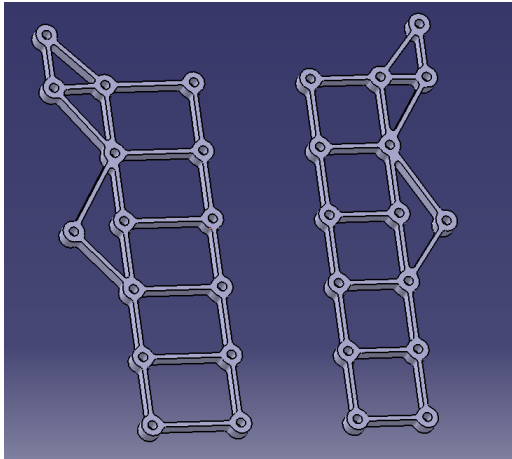
Nii tõmbe kui ka väsimuskatsest saab järeldada, et nõrgem materjali kihtide hulk on piisav. Töö alguses eeldati, et esimene purunemine laminaadis võiks aset leida umbes 20 kN juures, kuid hinnates rajal tekkivaid reaalseid jõude, vedrustuselementide varutegureid ning väsimuskatse tulemusi, võib 17 kN suuruse jõu juures toimuva esimese purunemise piisavaks lugeda. Antud olukorras on tagatud vedrustuse 4 kordne varutegur, mis on 2 korda suurem õõtshoobade varutegurist ning 1,5 korda suurem vedrustuse kõrvade varutegurist. Uued tugevduslapid suudavad koormuse laminaati jaotada nii, et laminaat ei purune enam tugevduslapi servast. Nõrgimaks kohaks on tugevdusseibi alla jääv ala. Antud probleemi on võimalik lahendada seibi alumist serva lihvides, millega on võimalik anda seibile suurem

kumerusraadius. Hetkel on terava serva tõttu laminaati sisse lõigatud ning peale sisemise materjalikihi läbistamist laminaat puruneb. Teine võimalus tugevdusseibi probleemi lahendamiseks on suurendada seibi mõõtu.

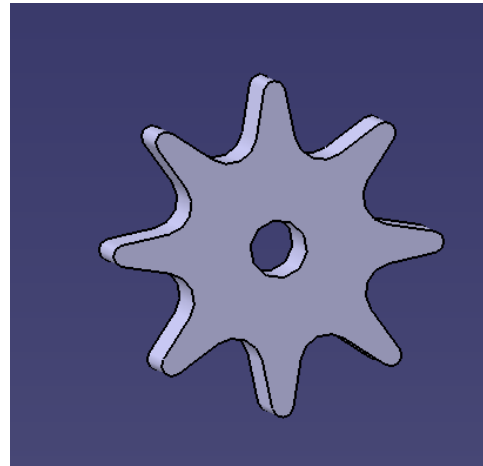
Peale 3. katsekeha teostati laminaatide freesimine, kust oli võimalik hinnata laminaadi sisemuses toimuvat. Lahtise klotsi kuivaksjäämise probleem oli juba siis näha ning oht, et infusioonides kõik tühimikud vaiku täis lähevad, oli suur. Hinnates 4. katsekeha kaalu, oli see eeldus põhjendatud ning monokokis tuleb kasutada kinnise klotsiga infusioonivahtu.

3.5 Erineva geomeetriaga kinnitusankrud monokokis

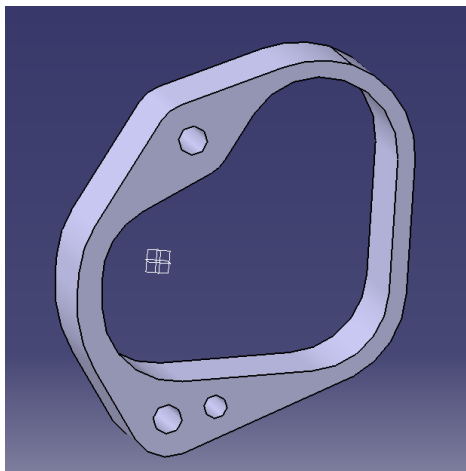
Peamine arendustöö ning LEM-analüüs teostati kahe poldiavaga kinnitusankrule, kuid monokokil on kasutusel ka teistsuguseid kinnitusankruid. Monokokk-kerele kinnituse projekteerides seati üheks eesmärgiks kasutada võimalikult palju standardseid kinnitusankruid, kuna sel juhul on arendusele minevad kulud väiksemad ning lisaks on arendusprotsess ka kiirem, kuna töö alustamise faasist kuni lõpp-produkti valmimiseni oli aega pool aastat. Eelnevalt on juttu olnud kahe poldiavaga kinnitusankrust, mis leiab kasutust kõige enam. Lisaks on vaja projekteerida ühe poldiavaga ankur, kergete ning väikese koormusega detailide kinnihoidmiseks vajalik kinnitus, stabilisaatorvarda ankur, mis on küll kahe poldiga, kuid oma ehitusliku omapära tõttu vajab see monokokki paigaldamiseks suurt ava. Auto ninas asuval piduri- ning gaasipedaali koostul on suure reguleerimisulatuse tõttu 4 erinevat kinnituspositsiooni ning koos tiivakinnitustega 30 erinevat kinnitusava. Ühe poldiavaga kinnitusankru kasutamine antud olukorras osutub liialt raskeks lahenduseks ning ühe suure kinnituse projekteerimine, mis integreerib endas nii pedaalide koostu kui ka tiivakinnituse, on õigustatud. Järgnevalt on välja toodud erinevate projekteeritud kinnitusankrute pildid ning lähemalt kirjeldatud pedaalikoostu kinnituse projekteerimist:



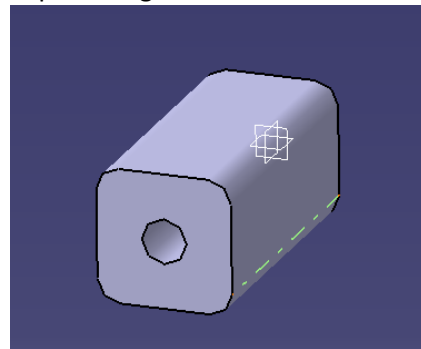
Tiivakinnituste ja pedaalikoostu ankur



1-poldiavaga ankur



Stabilisaatorvarda kinnitusankur

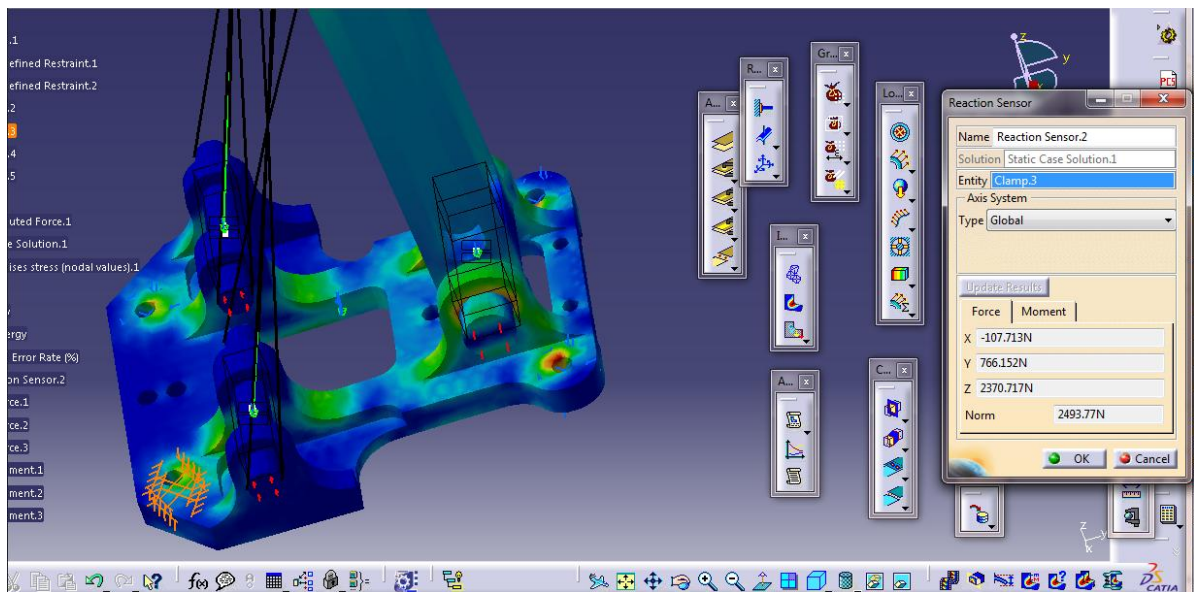


Kerge detailide kinnitusankur

Sele 3.40. Erinevad kinnitusankru lahendused

3.5.1 Pedaalikoostu kinnitusankur

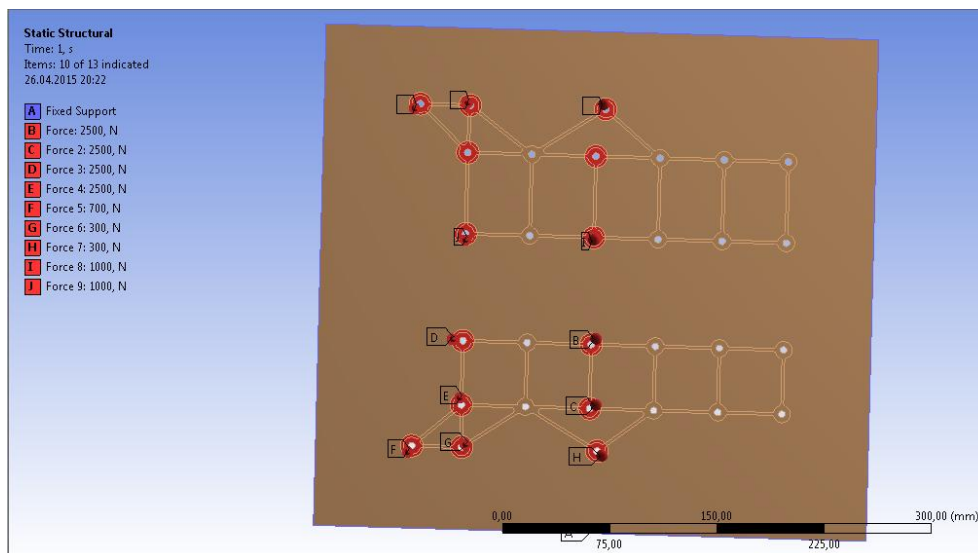
Järgnevalt on lühidalt tutvustatud pedaalikoostu kinnitusankru projekteerimist. Pedaalikoostu projekteerijalt, Tudengi vormeli meeskonna liikmelt Raivo Rästilt, saadi pedaalikoostu tugevusarvutuse fail, kust oli võimalik arvutada pedaalikoostu kinnituspunktides tekkivaid toereaktsioone. Järgnevalt on välja toodud illustreeriv pilt piduripedaali toereaktsioonidest.



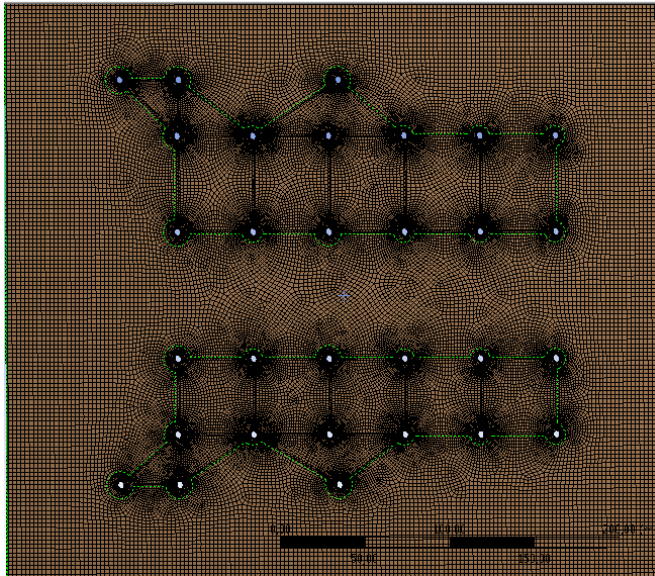
Sele 3.41. Piduripedaali toereaktsioon tagumises vasakpoolses kinnituspunktis

Toereaktsioonide jõud võeti nii tiivakinnituse kui ka gaasi- ning piduripedaali kinnituspunktidest ning koostati LEM-mudel, kus analüüsiti kinnitusankru võimalikku kuju ning laminaadi võimalikke kihte ning kiudude nurkasid.

Järnevalt on välja toodud Ansys *Static Structural*-i mudel koos rajatingimustega lõpliku kinnitusankru lahenduse korral.

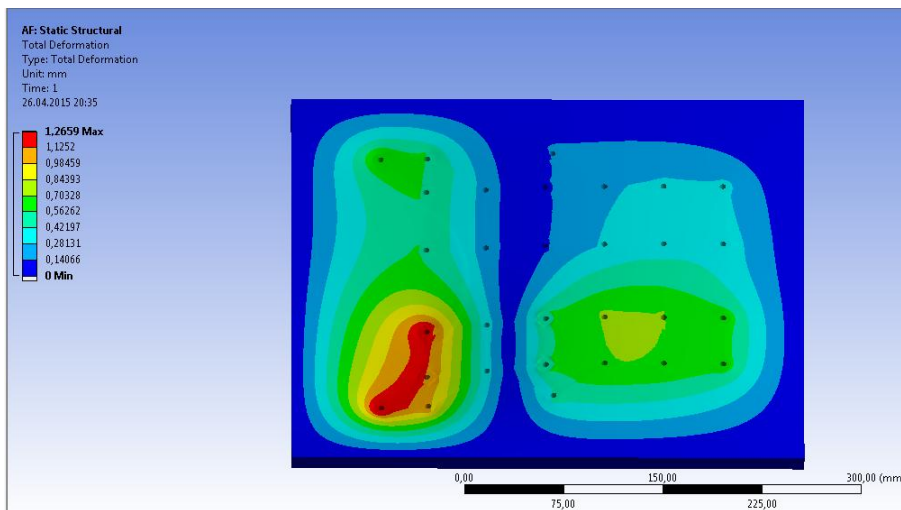


Sele 3.42. Pedaalikoostu ning tiivakinnituste kinnitusankru tugevusanalüüsi rajatingimused.



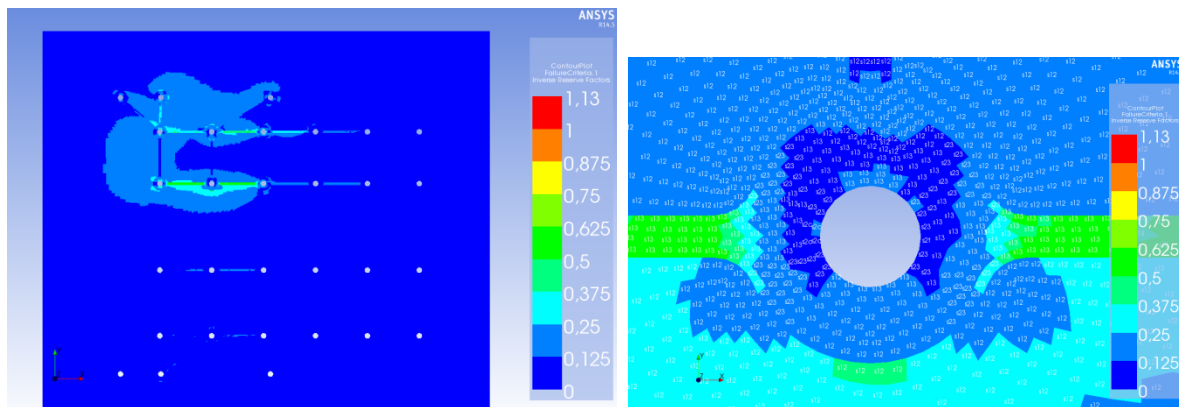
Sele 3.43. Pedaalikoostu analüüsi elementide võrgustik (55 084 elementi)

LEM-arvutus teostati koorikelementide meetodil. Jõud rakendati laminaadile poldiavade ümber ning jõu rakenduspindalaks on M6 seibi pindala. Laminaat on kinnitatud servadest jäigalt ning kõik vabadusastmed on ära võetud. Sele 6.44 on välja toodud laminaadi deformatsioonipilt pingelolukorrast ning on näha, et maksimaalne deformatsioon laminaadis on 1,26 mm.



Sele 3.44. Deformatsioon maksimaalse koormuse korral.

Pedaalikoostu jõud on arvatud reeglites ette nähtud olukorras, kus piduripedaali vajutatakse 2000 N suuruse jõuga, mida reaalselt ühe jalaga piduripedaalile rakendada on väga raske. Järgnevalt on välja toodud Ansys ACP komposiidianalüüsi tulemus.



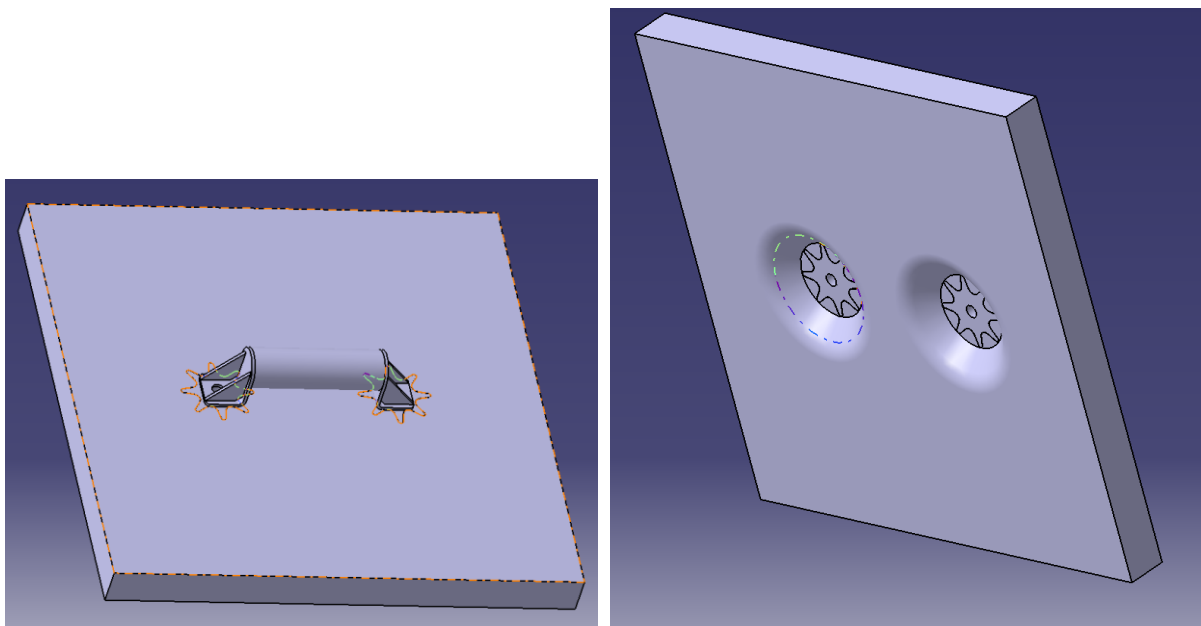
Sele 3.45. Pedaali- ja tiivakinnituste kinnitusankru tugevusanalüüs.

Analüüsist on võimalik hinnata, et ankur on võimeline vastu võtma pedaalikoostu ning tiivakinnituste poolt edasiantava koormuse. Purunemiskriteeriume hinnates domineerivad laminaadis normaalihilised nihkepinged. Pedaalikoostus kasutati järgmist materjalikihtide asetust: (tvill 0° , biaktsiaal 0° , tvill 45° , lapp biaktsiaal 0° , lapp biaktsiaal 45° , lapp tvill 0° , lapp tvill 45° , klaas 0°). Antud kihtide asetus on sümmeetriline ning nende vahel on 10 mm paksune vaht. Töö lõpuosas peatüki 5, "Kinnitusankrute ning tugevduslappide kogused", all on välja toodud ka tugevduslappide täpsed mõõdud ning kaalud.

Mõlema ninaankru kaal kokku on 220 g. Teine variant pedaalide ning tiibade kinnitamiseks oleks olnud ühe poldiga kinnitusankur. Ühe poldiavaga ankrul võib probleemiks olla valmistamise täpsus, mille tõttu pedaalid ei kinnitu korrektselt monokoki külge. Ühe pedaalikoostu kinnitusavade integreerimine ühte kinnitusankrusse muudab valmistamise lihtsamaks ning lisaks tagab ka nõutava täpsuse. 1-poldiavaga ankur kaalub 23 grammi. Pedaalide ning tiibade kinnitamiseks on vaja 30 erinevat ava. Juhul kui igas avas kasutatakse eraldi kinnitust, tuleks kinnituste kogukaaluks 690 g, mis on rohkem kui 3 korda raskem kinnitusest, mis integreerib omavahel nii pedaalikoostu- kui ka tiivakinnitused.

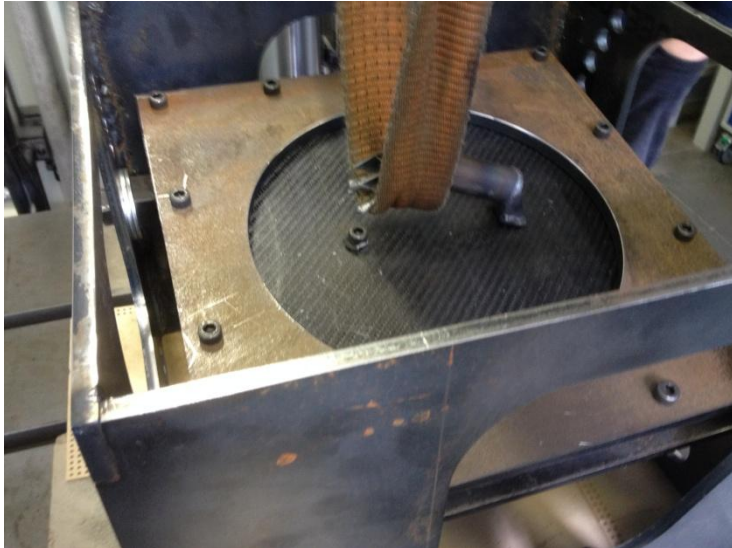
4. SES-i JAOKS VAJALIKE KATSETUSTE TEOSTAMINE

Võistlustele pääsemiseks tuleb meeskondadel täita SES (ing. k. *Structural Equivalency Spreadsheet* ehk võistlusauto struktuuri määrav dokument), kus on kirjas auto ehituslikud parameetrid ning erinevad materjalikatsetused. Monokokk-kere puhul on turvavöö kinnituspunktile ette antud minimaalsed tugevused, mida laminaat enne purunemist taluma peab. Õlarihmade kinnituskõrvad peavad taluma 13 kN suurust koormust ning sukeldumisvastaste rihmade kinnitus vähemalt 13 kN suurust koormust. Turvavöödes on kasutusel 1-poldiavaga kinnitusankrud.



Sele 4.1. Turvavöö õlarihma kõrv ning ankrud laminaadis

Turvavöö õlarihma kõrv on projekteeritud FS Team Tallinna liikme, Joonas Eametsa, poolt. Reeglites on välja toodud, et turvavöö kõrvasid tuleb tõmmata nurga all nagu nad autos on. FEST15 vormelautol on õlarihmadel selleks nurgaks 10° ning sukeldumisvastastel rihmadel 60° , mis on ka reeglites paika pandud nurkadest võimalikest kõige suuremad.



Sele 4.2. Turvavöö õlarihma kinnitusankru ja kinnituskõrva katsetamine

Eelneval katsetamise pildil on näha, et turvavöö kinnituskõrva keevisõmblus purunes. Laminaadi järgneval visuaalsel hindamisel defekte ei leitud. Laminaat pidas vastu 26,4 kN, mis ületab minimaalset ette antud 13 kN suurust normi. Turvavöö laminaadis kasutati sümmeetrilist materjalikihtide asetust: (tvill 0°, uniaksiaal 0°, tvill 45°, lapp tvill 0°, lapp tvill 45°, klaasriie 0°)_s. Kahe materjalikihi vahel kasutati 25 mm paksust vahtu ning kasutati kausikujuliselt faasitud vahtu. Tugevduslappide moodsus on samad, mis oli välja toodud 4. lahenduse peatükis 3.4. Laminaadi tugevus ületab ette antud norme küll ligi kahekordselt, kuid otsustati, et turvalisuse seisukohast ei hakata laminaati kergemaks tegema. Turvavöö kõrvad asuvad infusioonimise seisukohast monokokk-keres keerulises kohas ning võimalik kaalusääst 4 lapi eemaldamiselt oleks 10,2 g. Seega ei ole otstarbekas turvavöö õlarihmade kinnitust kergemaks teha.

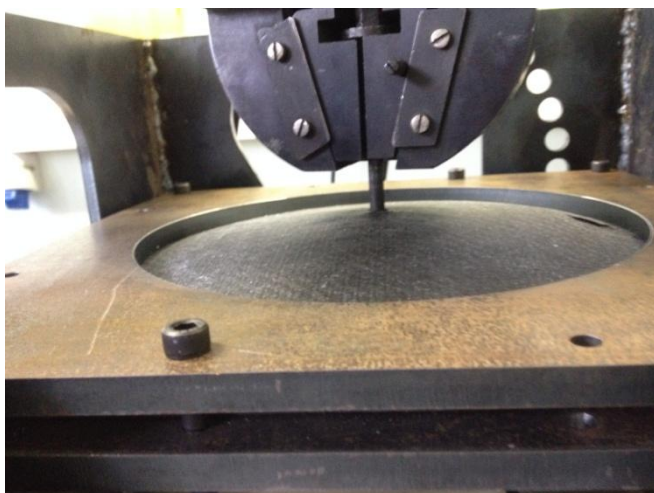
Teine katse, mis tuli teostada, oli sukeldumisvastaste rihmade katsetus. Sukeldumisvastased rihmad peavad taluma vähemalt 6,5 kN suurust koormust. Juhul, kui analoogset kinnitust kasutatakse ka õlarihmade kinnitamiseks, peab antud kõrv vastu pidama 13 kN suuruse koormuse.



Sele 4.3. Sukeldumisvastase rihma ning õlarihma alumise kinnituse katsetus

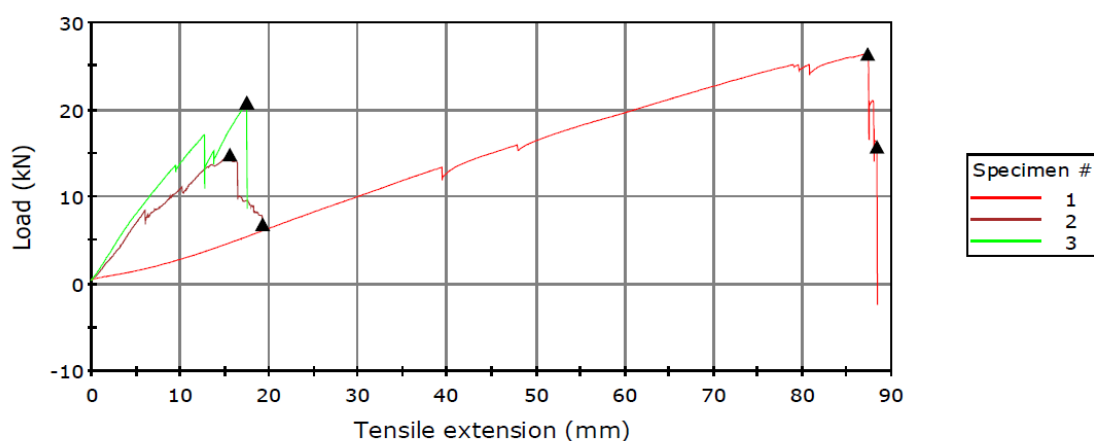
Katsetulemustest selgus, et kinnitusankur pidas vastu 14,9 kN suurusele koormusele, mis on vastuvõetav. Laminaadis kasutati sama materjalikihtide asetust, mis õlarihmade kinnituskõrvaga laminaadi korral. FEST15 monokokis kasutatakse antud kinnitusankrut nii õlarihmade alumise osa kinnitamiseks kui ka sukeldumisvastaste rihmade kinnitamiseks. Analüüsid laminaadi purunemist, siis purunemine on toimunud normaalsihilise nihkepinge tõttu. Materjali alumises kihis pragusid näha polnud, kuid pealmine kiht on täielikult purunenud.

Kolmas teostatud katse oli akukasti kinnitusankru tugevuskatse. Reeglitega on ette nähtud, et akukasti iga kinnituspunkt peab vastu pidama 20 kN suuruse jõu igas suunas. Kõige nõrgem on kinnitusankur normaalsihilise tõmbe korral ning seetõttu viidi antud katse läbi ka akukasti kinnitusankrule. Akukasti laminaadis kasutatakse 10 mm paksust vahtu ning täpne kihtide arv, kaal ning kiu nurgad on välja toodud peatükis 5, "Kinnitusankrute ning tugevduslappide kogused monokokk-keres".



Sele 4.4. Akukasti kinnitusankru katsetus

Akukasti laminaadi purunemine leidis aset rakise plaadi lähedalt, kus lõpevad tugevduslapid. Purunemine toimus normaalsihiliste nihkepingete tõttu. Järgnevalt on välja toodud graafik materjalikatsetuste andmetega:



| | Specimen label | Maximum Load (kN) | Load at Break (Standard) (kN) | Tensile extension at Maximum Load (mm) | Extension at Break (Standard) (mm) | Comment |
|------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Kahe poldiga kinnitus | 26,4 | 15,8 | 87,2 | 88,4 | Kinnitus tuli keevitusest lahti |
| 2 | Ühe aaspoldiga kinnitus | 14,9 | 6,9 | 15,6 | 24,8 | |
| 3 | Ühe poldiga kinnitus | 20,8 | 20,8 | 17,5 | 17,8 | |
| Mean | | 20,7 | 14,5 | 40,1 | 43,7 | |

Sele 4.5. SES-i jaoks vajalike katsete tulemused

Kahe poldiga kinnituse korral on tegemist ülemiste õlarihmade kinnitustega, mida katsetati koos kinnituskõrvaga. Ühe aaspoldiga kinnituse korral on tegu õlarihmade ning sukeldumisvastaste rihmade kinnitusega ning ühe poldiga kinnituse korral on tegemist akukasti kinnitusega. Katsetatud lahendused on sobilikud monokokis kasutamiseks.

5. KINNITUSANKRUTE NING TUGEVDUSLAPPIDE KOGUSED MONOKOKK-KERES

Kokku on FEST15 monokokis kasutusel 89 kinnitusankrut, mis kõik on valmistatud alumiiniumist ning kinnitusankrute kogukaaluks on 2442 g. Monokokk-kere ning kinnitusankrute tugevduslappide valmistamisel kasutatakse 200 g/m² tihedusega klaasriiet, 400 g/m² tihedusega biaktsiaal süsinikkangast, 300 g/m² tihedusega uniaktsiaal süsinikkangast ning 200 g/m² tihedusega tvill süsinikkangast.

Tugevduslappide koguste määramisel jaotati kinnituskohad nendes kohtades mõjuvate jõudude järgi kolme erinevasse kategooriasse:

- kõrge
- keskmine
- madal koormus

Kõrge koormusega kinnituspunktides kasutati mõlemal pool vahtu 5 tugevduslappi, keskmise koormusega kinnituskohades kasutati mõlemal pool vahtu 3 tugevduslappi ning madala koormusega kohtades kasutati mõlemal pool vahtu ainult 1 tugevduslappi (klaasriiet vältimaks korrosiooni süsiniku ning alumiiniumi vahel). Lisaks oli eraldi kategoorias pedaalikoost, kuna antud kinnituskoha jaoks olid tugevduslappide mõõdud ülejäänud kinnituspunktidest tunduvalt suuremad.

Tabel 5.1. Kinnituspunktide tugevusklassid

| Koht | Lapp | Mõõt,mm | Kaal,g | Koht | Lapp | Mõõt,mm | Kaal,g |
|-----------------------|--------|---------|--------|-------------------------|-------------|---------|--------|
| Alumised õõtshoovad | Bi0 | d190 | 11,1 | Ülemised õõtshoovad | tw0 | d130 | 3,1 |
| Turvakaare kinnitused | bi45 | d160 | 8,6 | Turvavööd | tw45 | d100 | 2,1 |
| Akukast | tw0 | d130 | 3,1 | Stabilisaatori kinnitus | klaas0 | 150x150 | 4,8 |
| Nookurid | tw45 | d100 | 2,1 | Roolisüsteem | vaht | | |
| Amordid | klaas0 | 150x150 | 4,8 | Monokokk-kere tagasein | klaas0 | 150x150 | 4,8 |
| | vaht | | | | tw45 | d100 | 2,1 |
| | klaas0 | 150x150 | 4,8 | | tw0 | d130 | 3,1 |
| | tw45 | d100 | 2,1 | | Kokku | | 20 |
| | tw0 | d130 | 3,1 | | | | |
| | bi45 | d160 | 8,6 | | | | |
| | bi0 | d190 | 11,1 | | | | |
| | Kokku | | 59,4 | | | | |
| Koht | Lapp | Mõõt,mm | Kaal,g | Koht | Lapp | Mõõt,mm | Kaal,g |
| Muud kohad | Klaas0 | 150x150 | 4,8 | Pedalbox | twill0 | 360x360 | 30,4 |
| | vaht | | | | twill45 | 310x300 | 21,8 |
| | klaas0 | 150x150 | 4,8 | | klaas0 | 260x250 | 13,9 |
| | Kokku | | 9,6 | | vaht | | |
| | | | | | klaas0 | 260x250 | 13,9 |
| | | | | | lapptwill45 | 310x300 | 21,8 |
| | | | | | lapptwill45 | 360x300 | 30,4 |
| | | | | | Kokku | | 132,2 |

Tabel 5.2. Tugevduslappide kogused ning kogu kinnitusankrute süsteemi kaal.

| Lapp | kogus,tk | Nimi | tk | mass,g | Mass kokku,g |
|-------|----------|-----------------------------|----|--------|--------------|
| Bi0 | 64 | Pedaalikoostu kinnitusankur | 2 | 100 | 200 |
| Bi45 | 64 | Täht,1-ava | 46 | 22 | 1012 |
| tw0 | 114 | Täht,2-ava | 41 | 30 | 1230 |
| tw45 | 114 | Lapid | | | 2884,4 |
| klaas | 174 | Kokku | 89 | | 5326,4 |
| Kokku | 530 | | | | |

FEST15 monokokk-keres kasutatakse kokku 530 tugevduslappi ning nende kogukaaluks on 2884g. Seega võib kokkuvõtlikult öelda, et terve kinnitusankrute süsteem lisab auto massile 5326g.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistriõppe lõputöö eesmärk oli projekteerida kinnitusankrute süsteem Tudengi vormeli meeskonna vormelautole FEST15. Antud vormelauto on meeskonna ajaloos esimene süsinikkomposiitmaterjalist monokokk-kerega sõiduk ning seetõttu puudus meeskonnal ka eelnev kogemus süsinikkomposiitmaterjalist kandevkeredega.

Tootarendus viidi läbi ühtaegu nii arvutis, kus teostati CAD-projekteerimist Catia V5R21 programmis ning viidi läbi tugevusanalüüse Ansys 14.5 ACP keskkonnas, kui ka reaalsete materjalikatsetustega. Esialgse arendusprotsessi ajal erinesid reaalsete katsetuste ning arvutis teostatud LEM-arvutuste tulemused teineteisest oluliselt. Pärast materjalikatsetuste teostamist Ansys-i programmi jaoks saavutati olukord, kus teoreetilised ja tegelikud näitajad omavahel klappisid. Arendustöö käigus tuli projekteerida ning valmistada ka kinnitusankrute katsetamiseks sobiv rakis, kuna esialgne plaat deformeerus liiga palju ning katsete tulemused ei olnud reaalsed.

Esialgsed kinnitusankrute katsetused viidi läbi eelmise aasta akukaste ümbritseva külgmise kasti materjalikihtide järgi, mis SES-i andmetel pidas vastu 30 kN suurusele nihkepingele. Tegemist oli võrdlemisi raske ning tugeva materjalikihtide hulgaga ning seetõttu pidasid tugevamad katsekehad vastu 45 kN suurusele tõmbekoormusele, mis ületasid soovitud koormust 1,5 kordselt. Esialgsete laminaadikatsetuste käigus ei olnud olulisemaks laminaadi üldine tugevus vaid soov oli kindlaks teha sobivaim kinnitusankru geomeetria. Seetõttu valmistati kõik katsekehad sama materjalikihtide arvuga ning ainsaks muutujaks oli erinev kinnitusankru geomeetria. Kinnitusankru sobiv kuju, mis oli ühtlasi kerge kui ka tugev, oli selge peale kolmandat materjalikatsetust. Lõplikuks valikuks osutus tähekujuline kinnitusankur, kuna tegemist on kõige parema nihkepindala ja massi suhtega lahendusega. Lisaks pakub antud geomeetria kõige sujuvamat jõudude ülekannet kinnitusankrust laminaati. Antud lahendus toimis kõige paremini nii LEM-keskkonnas kui ka katselaboris läbi viidud katsetel. Tähekujuline kinnitusankur oli ka kõige kergemaks lahenduseks kaaludes 30 g. Neljas laminaadikatsetus otsustati läbi viia, kuna selleks ajaks oli paigas ka monokokk-kere üldine materjalikihtide paigutus ning kinnitusankrute süsteem tuleb projekteerida monokokk-kere kihtide järgi. Eelnevalt see teada polnud ning seetõttu pöörati katsetustes rõhku sobivate tugevduslappide suuruse ning kinnitusankru ja vahu geomeetria arendamisele.

Esialgsel katsetusel selgus, et vaht ei hoia kinnitusankrut enda küljes kinni ning laminaadis domineerivad normaalsihhilised jõud (Z-telje sihilised), mis süsinikkomposiitmaterjalidel on oluliselt madalamad kui tõmbe-survejõud (piki kiudu mõjuvad jõud). Sobivaks vahu geomeetriaks, mis rakendas tööle ka laminaadi X- ja Y-suunalisi kiudusid, osutus kausikujuliselt faasitud vaht.

Neljanda laminaadigrupi katsetusega, mis viidi läbi monokokk-kere kihtide järgi valmistatud kinnitusankru katsekehaga, selgus, et laminaat vastab nõuetele, kuid piisav tugevus ei tähenda alati pikka eluiga. Seetõttu otsustati läbi viia ka väsimuskatsetus Rapla kardirajal mõjuvate vedrustuse jõudude põhjal. Väsimuskatse näitas, et nõrgema laminaadi tugevuse korral kinnitusankru elueaga mingeid probleeme ei esine ning monokokk-kere kinnitusankrud peavad vastu ka oluliselt suurema tsüklilise koormuse korral kui seda vedrustuses tekib ning kinnituspunktid peavad vastu mitu hooaega. Võttes hüpoteesiks olukorra, et iga Rapla kardirajal mõjuv vedrustuse jõud on 5 kN suurune, saaks autoga sõita 1450 km, mis on ligi 3 korda rohkem kui ühe hooaja läbisõit. Peale 53 274 tsüklilise +/-5 kN ning 2036 tsüklililise +/-10 kN suuruse koormusskeemi rakendamist suurenes laminaadi deformatsioon 86 %.

Peale kolmandat laminaadikatsetust freesiti detailid pooleks hindamaks täidismaterjali ning liitepindade seisukorda peale kinnitusankrute mehaanilist katsetamist. Lõikepindade hindamine andis väga palju kasulikku tagasisidet, mis muutis nii monokokk-kere kui ka kinnitusankrute arendust. Esiteks tehti kindlaks, et West Systems-i täidismaterjal, mis on spetsiaalselt mõeldud kinnitusankrute liimimiseks, ei moodusta tugevat sidet materjalikihtide, vahu ning kinnitusankru vahel ning paremaks lahenduseks liimimiseks on epovaik. Teine järeldus, mida lõikepindade vaatlusest tehti, oli see, et lahtise vahuga laminaadis tekivad nihkepinged vahusoontesse, mis põhjustavad laminaadi fataalset purunemist. Lisaks on lahtise klotsiga vaht raske ning seetõttu otsustati tellida sobiva paksusega infusioonivahtu, kuna lõikepindade hindamisel on näha, et infusioonivaht käitub kinnitusankru töökoormuste korral paremini.

Lõplikuks kinnitusankru materjaliks osutus alumiinium 6082-T6. Lisaks tuli tähelepanu pöörata ka laminaadi korrosioonile ning kõige otstarbekamaks lahenduseks osutus 200 g/m² pindtihedusega klaasriide kasutamine süsiniku ning alumiiniumi vahel. Antud lahendus on ühtlasi kasulik nii majanduslikult kui ka monokoki tugevuse seisukohalt. Klaasriie on oluliselt soodsam kui titaan ning lisab kere kinnituspunktile tugevust.

Hetkeseisuga pole FEST15 vormelauto veel ühtegi meetrit sõitnud ning reaalse tagasiside kinnitusankrute toimimise kohta puudub. Lisaks teoreetilistele arvutustele on läbi viidud ka hulgaliselt reaalseid katsetusi, mis imiteerivad auto reaalselt toimimist ning katsete tulemused on olnud edukad.

Autori enda arvates on lõputöö tulemused head. Esialgse 500 g kinnitusankru kaalu õnnestus vähendada 30 g peale ning esialgu lootusetuna tundunud ülesanne õnnestus lõpuks edukalt täita. Projekteeritud kinnitusankrud vastavad kõikidele töö alguses esitatud nõuetele.

SUMMARY

This master thesis contains all the stages of monocoque insert design for the Formula Student Team Tallinn race car FEST15. It is the first time for the team to build a monocoque chassis. Product development was carried out in CAD and FEA programs and also experimentally. The main CAD program used, was Catia V5R21, all the structural calculations were made in Ansys 14.5 and all the laminate tests were carried out in TUT test laboratory.

In the beginning of the thesis assignments were set which have to be done to design and manufacture a proper insert solution. The first task was to verify the rules which had to be followed because otherwise it would be impossible to pass technical scrutineering. There are rules which state the strength required from each insert. For example the accumulator container connection point must withstand 20 kN and the connection point between two main structure elements must withstand 30 kN in any direction.

Secondly, information about different inserts were researched to verify the solutions which are appropriate for the monocoque. After that the design process started concurrently in CAD and in FEA. Different solutions were modeled in Catia V5R21 and composite structural calculations were made in Ansys 14.5 ACP. After finding the proper solution, test specimens were made and tested in TUT laboratory. In the insert developing phase four different laminate tests were carried out. The first insert design was a round insert with a one bolt connection because the testing jig and bracket were not ready. The first specimen was pushed to get the approximate insert strength. All other specimens were pulled.

The testing jig was designed simultaneously with the inserts. At the beginning of the design phase some demands were set, which the jig must apply to. Firstly, it has to withstand 30 kN of force and the factor of safety must be at least 1,5. Secondly, the possibility to adjust the pulling and pushing angle between 0° - 60° . Finally it must be possible to transport the jig with two persons and the design must be without any free play because otherwise the results of the fatigue test will be disturbed.

The second test specimen was a two bolt insert. The main task was to distribute forces across the laminate because the first test showed that the weakest place is located between the insert and the foam. The laminate skin was the same as on the first design and the only thing changed, was the insert and foam design. A new foam design with a bowl shape around the insert was used and it showed good results. The laminate was stronger and it was able to

withstand 33 kN of pulling force. In addition, the insert and foam connection did not brake and thus it was clear that this foam geometry works well.

The third specimen was made with a bowl shaped foam geometry. The main task of this development phase was to improve the strength of the insert and to raise the first ply failure. Different insert designs were analyzed and tested and the star shaped insert showed the best results. It was able to carry 45 kN of pulling force. Second part of the third laminate testing was the skin optimization. FEM program showed that forces apply mainly in the inner skin and therefore the outer skin was made thinner. Testing in the laboratory showed that the FEM calculations were not correct and the cracks evolved on the outer skin.

The fourth specimen was made with a bowl shaped foam geometry, with a star shaped insert and with a new, lighter lay-up. This time the strengtning patches were symmetrical and the laminate was able to withstand 36 kN . After that a fatigue test was carried out because the fourth specimen was able to meet the demands set. The fatigue test was made with suspension forces logged from driving on the Rapla Kartcircuit. On the test, a 5 kN to -5 kN force was used which changed sinusoidally. After 53 274 cycles the deformation increased 18% for pulling forces and 0% for pushing forces. In Rapla race track, the maximum force occurs 4 times per lap and therefore it is possible to drive 18 379 km. In case all the forces which occur in race track are maximum, then it is possible to drive 1450 km, which is 3 times more than necessary. After the 5 kN test the strength was raised to 10 kN and the fatigue test was continued. After 2036 cycles the test was stopped because deformation increased more than 86%. In case all the suspension forces which occur are 10 kN, it is possible to drive 55km and if the maximum force occurs 4 times per lap, it is possible to drive 701 km, which is 1,5 times more than one season mileage.

After the fatigue test, the test specimens for the accumulator container and for the seatbelts were made because these connection points have to be physically tested for the competition documentation. Accumulator insert was able to carry 20,8 kN which is 0,8 kN more than necessary. Seat belt connections were able to withstand 26,4 kN for the shoulder harness point and 14,9 kN for the anti-submarine and for the lap-belt lower connection point. The minimum for the shoulder harness point is 13 kN and although it was able to carry 26,4 kN the layup will be same because safety is important.

As a result of this master thesis, an insert system for the formula student race car FEST15 was designed. 530 pieces of strengtening patches and 89 inserts were used. The mass of the insert system is 5326 g.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Formula Studenti ning Formula Student Team Tallinna tutvustus. [WWW]
<http://formulastudent.ee/> (01.02.2015)
2. Stuttgarti meeskonna kinnitusankru lahendus. [WWW]
<https://www.facebook.com/RennteamUniStuttgart/photos/a.310738565765.156126.288479150765/10152641822195766/?type=1> (14.05.2015)
3. Chalmersi meeskonna kinnitusankru lahendus. [WWW]
http://twitter.com/ChalmersFormula/status/572876565085741057/photo/1/large?utm_source=fb&utm_medium=fb&utm_campaign=ChalmersFormula&utm_content=572876565085741057 (14.05.2015)
4. SAE. FSAE 2015-2016 reeglid. [WWW]
http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf [14.05.2014]
7. West Systems-i vaigu ning kõvendi andmeleht. [WWW]
http://www.westsysteminternational.com/images/Rebeccas_folder_-_publications/PRO-SET_INF-114_with_INF-211_Medium_Cure_Infusion_Epoxy.pdf (14.05.2015)
8. West Systems-i täidismaterjali tutvustus. [WWW]
<http://www.westsystem.com/ss/404-high-density-filler/> (14.05.2015)
9. Eraldusriide kasutamise eelised. [WWW]
<http://www.ptm-w.com/index.asp?pgid=204> (14.05.2015)
10. Võrgu kasutamise eelised. [WWW]
<http://www.easycomposites.co.uk/products/vacuum-bagging/infusion-mesh-medium.aspx> (14.05.2015)
11. MTI-vooliku kasutamise eelised. [WWW]
<http://german-advanced-composites.com/mti-hose/> (14.05.2015)
12. Imperium AcoustoCam i600PE pilt. [WWW]

<http://www.imperiuminc.com/FirstMap-PAUT-Comparison.pdf> (14.05.2015)

13. ETH Zürich. (2010). Verbindungstechnologien für FVK. [WWW]

https://www1.ethz.ch/structures/education/bachelor/faserverstaerkte_kunststoffe/Skript/151-0363_07_FVW-Verbindungstechnologien.pdf (14.05.2015)

14. Epovaigu termilised omadused. [WWW]

<http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf> (14.05.2015)

15. Süsinikplaadi maksumus. [WWW]

http://www.carbon-vertrieb.com/shop/product_info.php?products_id=452 (14.05.2015)

16. Rapla kardiraja pikkus. [WWW]

<https://www.spordiregister.ee/ehitised.php?eh=2658> (14.05.2015)

17. Ansys Standard ACP Training course materjalid. [WWW]

ftp://ansys:41250gbg!@ftp.edr.se/outgoing/Standard_ACP_TrainingCourse_Trainees.zip
(14.03.2014)

18. Al 6082 T6 mehaanilised omadused. [WWW]

http://www.vandf.co.uk/wp-content/uploads/2011/06/Aalco-Metals-Ltd_Aluminium-Alloy_6082-T6T651_148.pdf. (14.05.2015)

19. Komposiitmaterjalide mehaanilised omadused. [WWW]

http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp
(14.05.2015)

20. Arensbürger, D. (2005). Komposiitmaterjalid. 1. trükk. Tallinn: TTÜ kirjastus.

21. Wanberg, J. (2009). Composite Materials: Fabrication Handbook #1. 1st ed. Minnesota: Wolfgang Publications Inc.

22. Süsiniku korrosioon. [WWW]

<http://www.corrosionpedia.com/2/1556/corrosion/galvanic-corrosion-of-metals-connected-to-carbon-fiber-reinforced-polymers> (14.05.2015)

23. Michel, S.A., Kieselbach, R., and Martens, H.J. (2006). Fatigue strength of carbon fibre composites up to the gigacycle regime (gigacycle-composites). *International Journal of Fatigue* 28, 261–270.

24. Komposiitmaterjalide väsimustugevus. [WWW]

http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/l_fatigue.pdf (14.05.2014)

25. CES Edupack 2009 arvutitarkvara (GRANTA DESIGN). (10.05.2015)

26. Tvill pilt. [WWW]

<http://www.hiwtc.com/photo/products/27/03/71/37105.jpg> (14.05.2015)

27. Biaksiaali pilt. [WWW]

http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/biaxial-fabric-carbon-fiber-37817-6511483.jpg (13.05.2015)

28. UD kanga pilt. [WWW]

http://img.weiku.com/waterpicture/2011/11/3/22/UD_carbon_fiber_fabric_634579038741679974_2.jpg (13.05.2015)

29. Ansys Modeling and Meshing Guide. [WWW]

<http://www.ewp.rpi.edu/hartford/users/papers/enr/ernesto/hillb2/MEP/Other/Articles/MeshingGuide.pdf> (24.05.2015)

LISAD